

T

ISSN 1992-3252

ТРАНСПОРТА

**WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION**

3 2023
Том / Vol. 21



**FROM PROJECTS TO WIDE
IMPLEMENTATION: DRIVERLESS
AND AUTONOMOUS TECHNOLOGY**



Вторая обложка, С. 36, 115
Inner back cover, pp. 184, 263



Дан старт движению беспилотных грузовиков по трассе М-11 «Нева»

В рамках проекта «Беспилотные логистические коридоры» 14 июня 2023 года состоялся запуск доставки грузов беспилотными тягачами КАМАЗ по федеральной трассе М-11 «Нева». Старт движению «беспилотников» дал Первый заместитель Председателя Правительства РФ Андрей Белоусов. В мероприятии приняли участие Министр транспорта Виталий Савельев, Губернатор Санкт-Петербурга Александр Беглов и Раис Республики Татарстан Рустам Минниханов, председатель правления Государственной компании «Автодор» Вячеслав Петушенко, генеральный директор ПАО «КАМАЗ» Сергей Когогин.

Движение высокоавтоматизированных транспортных средств на трассе М-11 запущено в рамках экспериментального правового режима (ЭПР). Формирование программы ЭПР проходило при поддержке Минтранса России на площадке Ассоциации «Цифровой транспорт и логистика». Первыми свои грузы в беспилотном режиме повезли крупнейшие перевозчики: ПЭК, Globaltruck, «Газпромнефть-Снабжение».

В рамках эксперимента будет апробирована вся цепочка процессов беспилотной перевозки в коммерческом режиме с участием цифровой инфраструктуры, что в итоге позволит масштабировать проект на другие трассы.

В данном ЭПР участвуют производители беспилотного транспорта (ПАО «КАМАЗ»), крупнейшие перевозчики (ООО «Глобалтрак Лоджистик», ПАО «Магнит»), Государственная компания «Автодор», которая предоставляет дорожную инфраструктуру.

Правительство упростило порядок организации полётов беспилотников

Правительство Российской Федерации продолжает создавать условия для развития беспилотной авиации. С 1 марта 2024 года для гражданских беспилотников будут упрощены процедуры организации полётов. Необходимые для этого изменения внесены в федеральные правила использования воздушного пространства и утверждены Постановлением, которое подписал Председатель Правительства Михаил Мишустин. Документ подготовлен Минтрансом России совместно с Росавиацией.

Согласно обновлённым правилам разрешается запускать беспилотники над населёнными пунктами на высоте до 150 метров от земли или водоёма в светлое время суток. При этом беспилотник должен находиться в прямой видимости внешнего пилота и вне запретных зон. Эти зоны определит Минтранс России по представлению региональных и местных властей. Для организации таких полётов беспилотниками весом до 30 кг эксплуатантам не потребуется подавать план перемещения авиационным властям.

Упрощается порядок применения дронов в сельском хозяйстве, также у эксплуатантов появится возможность направлять план полёта с помощью цифровой платформы обеспечения деятельности по использованию воздушного пространства России и оперативно получать всю необходимую информацию для выполнения полёта, включая разрешения органов местного самоуправления.

По материалам Пресс-центра Министерства транспорта Российской Федерации:

<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10741>, <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10765>

Фотографии на обложках: пресс-центра Министерства транспорта Российской Федерации <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10741>.

Photos on the front and inner front and back covers: press centre of the Ministry of Transport of the Russian Federation <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10741>.

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

3 2023
(106)

Издаётся
Российским университетом
транспорта.
Учреждён МИИТ
в 2003 году

Редакционный совет:

Б. А. Лёвин – доктор техниче-
ских наук, профессор РУТ –
председатель совета

А. К. Головнич – доктор
технических наук, доцент
Белорусского государственного
университета транспорта

А. А. Горбунов – доктор поли-
тических наук, профессор РУТ

Б. В. Гусев – член-корреспон-
дент Российской академии
наук

Н. А. Духно – доктор юридиче-
ских наук, профессор РУТ

Д. Г. Евсеев – доктор техниче-
ских наук, профессор РУТ

В. И. Колесников – академик
РАН, профессор Ростовского
государственного университета
путей сообщения

К. Л. Комаров – доктор техниче-
ских наук, профессор Сибирско-
го государственного университе-
та путей сообщения

Б. М. Куанышев – доктор
технических наук, профессор,
заместитель председателя
КАЗПРОФТРАНС (Республика
Казахстан)

Б. М. Лапидус – доктор эконо-
мических наук, профессор

Д. А. Мачерет – доктор эконо-
мических наук, профессор РУТ,
первый заместитель председа-
теля Объединённого учёного
совета ОАО «РЖД»

Л. Б. Миротин – доктор
технических наук, профессор
Московского автомобильного
государственного технического
университета (МАДИ)

А. В. Сладковски – доктор
технических наук, профессор
Силезского технологического
университета (Республика
Польша)

Ю. И. Соколов – доктор эконо-
мических наук, профессор РУТ

Тран Дак Су – доктор техниче-
ских наук, профессор Универ-
ситета транспорта и коммуни-
каций (Ханой, Вьетнам)

Т. В. Шепитько – доктор тех-
нических наук, профессор РУТ

СОДЕРЖАНИЕ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

*Алексей ГВИШИАНИ, Игорь РОЗЕНБЕРГ,
Анатолий СОЛОВЬЁВ*

Геофизические процессы в Арктике и системный
анализ их воздействия на функционирование и развитие
транспортной инфраструктуры 6

НАУКА И ТЕХНИКА

*Максим КУДРОВ, Кирилл БУХАРОВ,
Даниил МАХОТКИН, Рафаэль АЙВАЗОВ*

Постановка задачи управления автономным надводным
судном для внутренних водных путей 36

Роман ТЛЯВЛИН

Оценка технического состояния набросных бун 42

Зульфия ФАЗИЛОВА

Влияние анизотропных свойств верхнего
строения железнодорожного пути на параметры
динамической осадки предмостовых участков 50

Алёна ЛЯШЕНКО

Разгрузочно-сегрегационная установка
песчаникового бута с энергонезависимым
приводом комплектующего оборудования 59

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

Илья УРЮПИН

Определение стандарта транспортной доступности
для внутренних пассажирских авиаперевозок 66

*Максим КОЛЕСНИКОВ, Виктор БОГАЧЕВ,
Вячеслав ЗАДОРЖНИЙ, Максим БАКАЛОВ*

Анализ конкурентоспособности малых портов
Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных
перевозках: технологические аспекты, оптимизационная
задача транспортного типа 74

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. А. ЛЁВИН –

главный редактор

Е. Ю. ЗАРЕЧКИН –

первый заместитель главного редактора

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Е. С. АШПИЗ –

д.т.н., доцент РУТ

Л. А. БАРАНОВ –

д.т.н., профессор РУТ

А. М. БЕЛОСТОЦКИЙ –

д.т.н., профессор РУТ

Г. В. БУБНОВА –

д.э.н., профессор РУТ

Ю. А. БЫКОВ –

д.т.н., профессор РУТ

В. А. ГРЕЧИШНИКОВ –

д.т.н., доцент РУТ

В. Б. ЗЫЛЁВ –

д.т.н., профессор РУТ

В. И. КОНДРАЩЕНКО –

д.т.н., старший научный сотрудник РУТ

А. А. ЛОКТЕВ –

д.ф.-м.н., профессор РУТ

С. Я. ЛУЦКИЙ –

д.т.н., профессор РУТ

О. Е. ПУДОВИКОВ –

д.т.н., доцент РУТ

В. Н. СИДОРОВ –

д.т.н., профессор РУТ

Н. П. ТЕРЁШИНА –

д.э.н., профессор РУТ

В. С. ФЁДОРОВ –

д.т.н., профессор РУТ

В. М. ФРИДКИН –

д.т.н., старший научный сотрудник РУТ

В. А. ШАРОВ –

д.т.н., профессор РУТ

А. К. ШЕЛИХОВА –

руководитель редакции

РЕДАКЦИЯ

Н. К. ОЛЕЙНИК –

технический редактор

М. В. МАСЛОВА –

английский перевод

При перепечатке ссылка на журнал «Мир транспорта» обязательна.

© «Мир транспорта», 2023

*Сергей ВАКУЛЕНКО, Дмитрий РОМЕНСКИЙ,
Кирилл КАЛИНИН*

Типизация проектов развития высокоскоростных железнодорожных магистралей. 85

БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ

Борис ЛЁВИН, Виктор ЦВЕТКОВ,

Николай ИСАИН, Андрей ОХОТНИКОВ

Развилки углеродного регулирования. 96

Валерий КОССОВ, Дмитрий КНЯЗЕВ,

Николай КРАСЮКОВ, Николай МАХУТОВ,

Михаил ГАДЕНИН

Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций. 106

Александр ЗЕМЛИН, Мария МАТВЕЕВА,

Евгения ГОЦ

Управление рисками безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств в мегаполисе: системно-правовой анализ. 115

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Валерий КУРГАНОВ, Михаил ГРЯЗНОВ,

Алексей ДОРОФЕЕВ

Исследование онтологии логистики историко-генетическим методом. 124

Пресс-архив

Северный Сибирский торговый путь

и Полярно-Уральская железная дорога. Часть 2 133

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Авторефераты диссертаций 146

Новые книги о транспорте 152

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 20 декабря 2002 г. Регистрационный номер ПИ № 77-14165.

Журнал выходит 6 раз в год. Номер подписан в печать 28.07.2023.

Тираж 150 экз. Цена свободная.

Отпечатано с оригинал-макета в типографии ООО «Амирит», 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 88, литер У.

Ознакомиться с содержанием вышедших номеров можно на сайте научной электронной библиотеки eLibrary.ru или на сайте <https://mirtr.elpub.ru>, с условиями публикации – на сайте <https://mirtr.elpub.ru>.

Журнал включён в Российский индекс научного цитирования, информация размещается в базах данных РГБ, Соционет, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.org.

World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 21 2023
Iss. 3

The journal is published
by Russian University
of Transport.

Founded in 2003 by MIIT.

Editorial council:

Boris A. Lyovin, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport, chairman

Alexander C. Golovnich, D.Sc.
(Eng), associate professor of
Belarusian State Transport
University

Alexander A. Gorbunov, D.Sc.
(Pol), professor of Russian
University of Transport

Boris V. Gusev, corresponding
member of the Russian Academy
of Sciences

Nickolay A. Duhno, LL.D.,
professor of Russian University of
Transport

Dmitry G. Evseev, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport

Vladimir I. Kolesnikov, member of
the Russian Academy of Sciences,
professor of Rostov State University
of Railway Engineering

Constantine L. Komarov, D.Sc.
(Eng), professor of Siberian State
University of Railway Engineering

Bakytzhan M. Kuanyshev, D.Sc.
(Eng), professor, deputy chairman
of KAZPROFTRANS (Republic of
Kazakhstan)

Boris M. Lapidus, D.Sc. (Econ),
professor

Dmitry A. Macheret, D.Sc. (Econ),
professor of Russian University of
Transport, first deputy chairman of
the United scientific council of JSC
Russian Railways

Leonid B. Mirotn, D.Sc. (Eng),
professor of Moscow State
Automobile and Road Technical
University

Taisiya V. Shepitko, D.Sc. (Eng),
professor of Russian University of
Transport

Aleksander V. Sladkowski,
D.Sc. (Eng), professor of Silesian
University of Technology (Republic
of Poland)

Yuriy I. Sokolov, D.Sc. (Econ),
professor of Russian University of
Transport

Tran Dac Su, D.Sc. (Eng),
professor of the University of
Transport and Communications
(Hanoi, Vietnam)

CONTENTS

Page numbering below refers to the texts in English

THEORY

*Alexey D. GVISHIANI, Igor N. ROZENBERG,
Anatoly A. SOLOVIEV*

Geophysical Processes in the Arctic and the System
Analysis of their Impact on Operation and Development
of the Transport Infrastructure 154

SCIENCE AND ENGINEERING

*Maxim A. KUDROV, Kirill D. BUKHAROV,
Daniil R. MAKHOTKIN, Rafael S. AIVAZOV*

Statement of the Problem of Control
of an Autonomous Surface Vessel for Inland Waterways 184

Roman M. TLYAVLIN

Assessment of the Technical Condition of Spur Dikes 189

Zulfiya T. FAZILOVA

The Impact of Anisotropic Properties
of the Rail Track Superstructure on the Parameters
of Dynamic Settlement of Bridge Approaches 197

Alyona Yu. LYASHENKO

Rubble Sandstone Unloading and Screening
Unit with Non-Volatile Auxiliary Equipment Drive 206

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS

Ilya V. URYUPIN

Defining Standard of Access to Domestic Air Travel 214

*Maxim V. KOLESNIKOV, Victor A. BOGACHEV,
Vyacheslav M. ZADOROZHNIY, Maxim V. BAKALOV*

Analysis of Competitiveness of Small Ports
of the Azov-Black Sea Basin in Multimodal Transportation: Technological
Aspects, Transportation Problem Optimisation 222

*Sergey P. VAKULENKO, Dmitry Yu. ROMENSKY,
Kirill A. KALININ*

Typification of Projects for Development of High-Speed Rail. . . . 233

EDITORIAL BOARD

Boris A. LYOVIN,

editor-in-chief

Evgeny Yu. ZARECHKIN,

first deputy editor-in-chief

BOARD MEMBERS

Evgeny S. ASHPIZ,

D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport

Leonid A. BARANOV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Alexander M. BELOSTOTSKIY,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Galina V. BUBNOVA,

D.Sc. (Econ), professor of Russian
University of Transport

Yuriy A. BYKOV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Victor S. FEDOROV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Vladimir M. FRIDKIN,

D.Sc. (Eng), senior researcher
of Russian University of Transport

Victor A. GRECHISHNIKOV,

D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport

Valeriy I. KONDRASHENKO,

D.Sc. (Eng), senior researcher
of Russian University of Transport

Alexey A. LOKTEV,

D.Sc. (Phys.-Math.),
professor of Russian University
of Transport

Svyatoslav Y. LUTSKIY,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Oleg E. PUDOVIKOV,

D.Sc. (Eng), associate professor
of Russian University of Transport

Victor A. SHAROV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Alla K. SHELIKHOVA,

head of editorial office

Vladimir N. SIDOROV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

Natalia P. TERYOSHINA,

D.Sc. (Econ), professor of Russian
University of Transport

Vladimir B. ZYLYOV,

D.Sc. (Eng), professor of Russian
University of Transport

EDITORIAL STAFF

Natalia C. OLEYNIK,

editorial secretary

Maria V. MASLOVA,

translator

© Mir Transporta

© World of Transport

and Transportation

© English translation

© 2023. All rights reserved

SAFETY AND SUSTAINABILITY

Boris A. LYOVIN, Victor Ya. TSVETKOV,

Nikolay V. ISAIN, Andrey L. OKHOTNIKOV

Bifurcation Points of Carbon Regulation 244

Valery S. KOSSOV, Dmitry A. KNYAZEV,

Nikolai F. KRASYUKOV, Nikolai A. MAKHUTOV,

Mikhail M. GADENIN

Regulatory Framework for Ensuring Safe

Operation of Railway Equipment Based

on the Service Life of Load-Bearing Structures 254

Alexander I. ZEMLIN, Maria A. MATVEEVA,

Eugenia V. GOTS

Risk Management for the Safe Use of Highly Automated Vehicles in

a Metropolis: Systems and Legal Analysis 263

HISTORY WHEEL

Valery M. KURGANOV, Mikhail V. GRYAZNOV,

Aleksey N. DOROFEEV

The Study of the Logistics Ontology

by the Historical-Genetic Method. 272

Archival Publications

Northern Siberian Trade Route and Polar Urals Railway. Part 2 . . 280

BIBLIO-DIRECTIONS

Selected Abstracts of D.Sc. and Ph. D. Theses

Submitted at Russian Transport Universities 292

New Books on Transport and Transportation 296

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.

106 issues have been published since 2003.

Current issues are circulated in 150 hard copies available on subscription.

All articles in the journal are published in Russian and English, both versions

being entirely identical. The emails of corresponding authors are marked with ✉.

The open accessed full texts of the articles, editorial politics and guidelines for

the authors are available at the Website of the journal at <https://mirtr.elpub.ru/jour>

(both in Russian and English). The authors can submit their articles either in

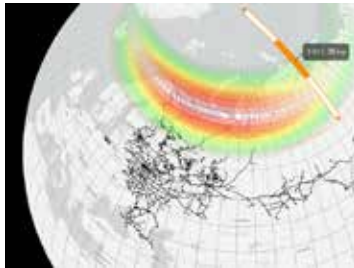
Russian or in English. The journal uses double-blind peer reviewing.

The full texts in Russian and key information in English are also available at the

Website of the Russian scientific electronic library at <https://www.elibrary.ru> (upon
free registration).

The journal is indexed in Russian scientific citation index system, Russian state
library, Socionet, Ulrichsweb, WorldCat.org.

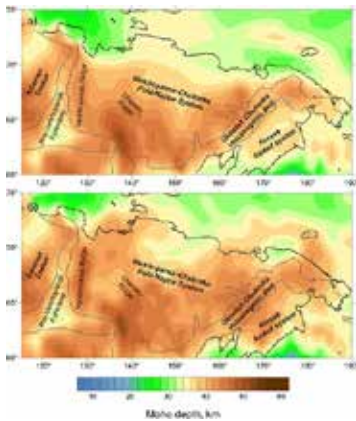
Any reproduction in whole or in part on any medium or use of English translation
of the articles contained herein is prohibited for commercial use without the prior
written consent of World of Transport and Transportation.



ГЕОФИЗИКА И ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА

6

Оценка влияния геофизических факторов на устойчивое функционирование транспортных систем и системный анализ их воздействия на транспортную инфраструктуру в арктических широтах.



ВОПРОСЫ ТЕОРИИ





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.3:656 (98)

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>

Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры



Алексей ГВИШАНИ



Игорь РОЗЕНБЕРГ



Анатолий СОЛОВЬЁВ

Алексей Джерменович Гвишани¹, Игорь Наумович Розенберг², Анатолий Александрович Соловьёв³

^{1,3} Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

^{1,3} Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия.

² Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

✉ ² i.rozenberg@geosc.ru.

АННОТАЦИЯ

Научные исследования, ставшие предметом рассмотрения в этой статье, связаны с оценкой влияния геофизических факторов на устойчивое функционирование транспортных систем и системным анализом их воздействия на транспортную инфраструктуру в арктических широтах. Они являются новым направлением в области изучения эксплуатационной надёжности транспортных систем и научного сопровождения развития транспортной инфраструктуры в российской Арктике.

В работе затронуты вопросы надёжности и возможных отказов технических средств под влиянием космической погоды. Также обсуждаются комплексные проблемы безопасности и эффективности развития транспортных систем с учётом новых данных о строении и свойствах литосферы,

связанных с растеплением многолетнемерзлых пород и месторождений полезных ископаемых. Отдельный раздел посвящён новым сведениям о сейсмической активности и оценке сейсмической опасности в районах эксплуатации и перспективного развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ).

Интеллектуальный учёт, обобщение получаемых междисциплинарных результатов и их визуализация обеспечиваются методами геоинформатики. В работе также представлены результаты внедрения современных систем управления базами геоданных, применения современных технологий геопорталов и интерактивных сферических визуализаций для качественного представления новых геофизических знаний, полученных в ходе исследований.

Ключевые слова: геомагнетизм, сейсмическая опасность, геофизические процессы, геологические структуры, геоинформатика, арктическая зона РФ, транспортные системы, транспортная инфраструктура, устойчивое развитие.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21–77–30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Для цитирования: Гвишани А. Д., Розенберг И. Н., Соловьёв А. А. Геофизические процессы в Арктике и системный анализ их воздействия на функционирование и развитие транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 6–34. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение российской Арктики в XXI веке неизбежно связано с повсеместным вовлечением высоких технологий. Такие технологии, в первую очередь, необходимы для стабильного развития промышленности и транспорта в труднодоступных регионах и экстремальных климатических условиях, неотъемлемо свойственных арктическому региону. Однако, будучи устойчивыми к данным природным факторам, сложные технологические системы зачастую становятся чувствительными к другим природным рискам.

Например, протяжённые линии электропередач (ЛЭП) и трубопроводы в высокоширотных областях эффективно справляются с низкими температурами, уверенно выполняя свои функции на обширных территориях. Вместе с тем, угрозой их устойчивому функционированию служат экстремальные проявления космической погоды. Последние могут приводить к чрезмерным нагрузкам на электроэнергетические системы и установки, обеспечивающие антикоррозийную защиту трубопроводов, вплоть до их полного выхода из строя. Таким образом, помимо климатических изменений [1], целый ряд сугубо геолого-геофизических факторов должен учитываться как для устойчивого функционирования уже имеющихся высокотехнологичных систем в Арктике, так и при планировании дальнейшего развития указанных инфраструктур в ещё неосвоенных регионах.

Современное технологическое общество представляет собой сложное переплетение зависимостей и взаимозависимостей между несколькими его критически важными инфраструктурами [2]. По мере роста сложности технологических инфраструктур любое серьёзное нарушение работы одной из них может иметь широкомасштабные последствия для других и приводить к взаимозависимым отказам [3]. Воздействие на эти взаимозависимые инфраструктуры может продолжаться в течение нескольких лет с возможностью проявления значительных социальных и экономических воздействий [4; 5].

Развитие транспортной инфраструктуры имеет критическое значение как при частичном, так и при полномасштабном освоении Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Это подчёркивает и «Стратегия развития Арктической зоны Российской Феде-

рации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», утверждённая Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645. Среди прочего данная стратегия предусматривает существенное развитие транспортной инфраструктуры в целом ряде северных регионов России, которое включает в себя строительство новых железнодорожных магистралей, межрегиональных автомобильных дорог и аэропортов, создание водных путей с учётом планов по освоению минерально-сырьевой базы полезных ископаемых и обеспечению связи морских портов с внутренними территориями страны. Комплексное, взаимосвязанное и системное развитие инфраструктуры морского, воздушного, железнодорожного и автомобильного транспорта АЗРФ предполагает интенсивное наращивание системных фундаментальных и прикладных исследований в интересах изучения и освоения Арктики, учитывающих экстремальные природно-климатические особенности региона. Научное сопровождение развития транспортных систем предполагает системно-аналитическую консолидацию усилий специалистов разных геофизических и смежных направлений, таких как геомагнетизм [6; 7], сейсмология, климатология, геотектоника, геоинформатика и др. Эффективный интеллектуальный учёт и обобщение получаемых междисциплинарных результатов обеспечиваются благодаря системному анализу.

В настоящей работе авторы намерены сосредоточиться на нескольких важных геолого-геофизических результатах. Каждый из них в отдельности и все они в целом имеют критическое значение и требуют несомненного учёта при эксплуатации и развитии транспортной инфраструктуры в АЗРФ. В первом разделе приводятся результаты оценки негативного воздействия космической погоды на работу современной сигнальной железнодорожной электроники, электроснабжение и точность позиционирования и навигации. Во втором разделе представлены новые результаты по изучению крупных геологических структур и осадочных бассейнов. Последние могут быть связаны с месторождениями углеводородных ископаемых, а также других важных геофизических характеристик литосферы Арктики. В третьем разделе приведены новые важные сведения о сейсмической активности АЗРФ. Четвёртый раздел



содержит результаты в области геоинформатики, получаемые интегрированием в единой среде новых данных по трём перечисленным направлениям. Это открывает возможности комплексной обработки, системного анализа и визуализации полученных геофизических результатов. В заключительном разделе статьи представлены выводы.

Научные исследования, ставшие предметом этой статьи, являются новым направлением в области эксплуатационной надёжности транспортных систем. Самые актуальные вопросы для транспорта – надёжность и безопасность, в различных аспектах многократно рассматривались во многих публикациях журнала «Мир транспорта». Но влияние геофизических факторов на устойчивое функционирование транспортных систем, системный анализ их воздействия на транспортную инфраструктуру в арктических широтах представлены впервые.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Влияние космической погоды на функционирование транспортных и вспомогательных инженерных систем в высоких широтах Российской Федерации

1.1. Воздействие геомагнитной активности на сбои в работе железнодорожной сигнальной автоматики

Космическую погоду в основном определяют солнечные вспышки, корональные выбросы массы, высокоскоростные потоки плазмы из солнечных дыр, вызывающие геомагнитные бури и суббури. Общее количество энергии, выделяющейся при магнитной буре средней интенсивности, составляет около 1400 ГВт, что почти вдвое превышает мощность всех электростанций США. Инфраструктурные сети большой протяжённости, такие как железные дороги, расположенные в высоких широтах, подвержены влиянию геомагнитных возмущений [8; 9]. Во время геомагнитных бурь магнитное поле Земли может быстро и сильно меняться во времени, что провоцирует возникновение разности электрических потенциалов до нескольких вольт на километр, что в свою очередь приводит к появлению геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в протяжённых проводниках. ГИТ может оказывать существенное влияние на работу инженерных систем. С точки зрения

безопасности на железной дороге наиболее важными системами, на которые могут повлиять ГИТ, являются системы сигнализации и управления движением [10]. Во время сильных геомагнитных возмущений наблюдаются случаи кратковременной (1–2 минуты) ложной занятости путей, которые могут повторяться в течение 3–4 часов [11]. Возникновение аномалий сигнала объясняется индуцированными токами в земле во время сильных геомагнитных бурь. В этих условиях естественное электрическое поле достаточно велико, чтобы снизить рабочее напряжение на реле. В зависимости от направления ГИТ в рельсах может загораться как ложный красный свет при свободном пути (любое направление ГИТ), так и ложный зелёный – при занятом (ГИТ с обратным знаком). Разумеется, наиболее опасным является ложный зелёный свет.

Исторически первым описанным событием, связанным с аварией железнодорожной сигнализации, явилась «буря Нью-Йоркской железной дороги» 13 мая 1921 года (New York Railroad Storm) [12]. Буря исключительной силы произошла на четвёртом году после максимума 15-го солнечного цикла [13]. Прелюдией этой магнитной бури явилась двойная вспышка на лимбе Солнца, видимая даже невооружённым глазом [14]. В качестве примера современных происшествий приведём бурю в июле 1982 года, когда сбои в работе железнодорожной автоматики были отмечены на юге Швеции [15]. Магнитная буря 13–14 июля 1982 года развивалась на фоне спада солнечного цикла и достигла в максимуме значений $Dst = -325$ нТл. Во время развития возмущения на Шведской железной дороге были проблемы со световой сигнализацией: сигнальный светофор переключался между красным и зелёным светом без видимых причин.

В России исследования связи аномалий в работе железнодорожной сигнализации с геомагнитными возмущениями начались сравнительно недавно [16]. Так, в [10; 17; 18] исследовалась статистическая связь между уровнем геомагнитной активности и длительностью сбоев в работе систем автоматики Восточно-Сибирской железной дороги в 2004 году. Было показано, что суммарная суточная длительность аномалий, не связанных с механическими повреждениями и метеорологическими причинами, на всех участ-

ках дороги меняется в согласии с развитием геомагнитной бури. Эта длительность увеличивается в три раза при достижении пика геомагнитной активности и коррелирует с локальным индексом геомагнитной активности. Тем самым, во время сильных бурь рост числа сбоев наблюдается даже на средних широтах.

При анализе сбоев в работе систем сигнализации на Северной железной дороге [11] было выявлено, что практически каждая сильная геомагнитная буря из 16 проанализированных явилась причиной аномалий в работе сигнальной автоматики. Полученное в работе распределение зарегистрированных аномалий от местного времени согласуется с известным распределением периодов развития ГИТ [19; 20]. Сбои в работе систем автоматики, в частности, ложные срабатывания светофоров, связывались с наводкой электрического поля на рельсы поперёк пути, что могло вызывать имитацию прошедшего локомотива. Анализируя сбои в работе сигнальной автоматики Северной и Октябрьской железных дорог за 2009–2010 годы (23-й цикл солнечной активности), авторами [21] было установлено, что аномалии в работе систем автоматики развиваются почти синхронно и в тесной связи с возбуждением значительных геоэлектрических полей.

Для уточнения закономерностей в проявлении воздействия геомагнитных возмущений на работу автоматики железных дорог и поиска путей ограничения воздействия представляется целесообразным подробное исследование аномалий в работе систем автоматики и сигнализации на участках железнодорожных сетей, расположенных, в первую очередь, в арктической и субарктической зонах. В этой связи был проанализирован обширный архив журнальных записей запроотоколированных сбоев в работе железнодорожной автоматики на участке Октябрьской железной дороги от ст. Кандалакша (67.15° СШ) до ст. Никель-Мурманский (69.4° СШ) за 2001–2006 гг. (рис. 1). Архив содержал информацию о более 1800 записях, и такой объем информации о сбоях был проанализирован впервые [22].

В архиве для некоторых событий была указана причина, для некоторых – нет. Причины, указанные в рапортах и журналах железнодорожных служб, как правило, были связаны с обрывами, ударами и механически-



Рис. 1. Рассматриваемый участок Октябрьской железной дороги (жёлтая пунктирная линия) и расположение магнитной станции «Ловозеро» (IAGA-код LOZ, красный цвет) в Мурманской области [подготовлено с участием авторов].

ми разрывами кабелей, с метеорологическими причинами (попадание льда и песка в стрелки), с вмешательством посторонних лиц, то есть заведомо не были вызваны геомагнитными факторами. Для досконального статистического анализа весь архив был разбит на следующие три категории событий:

1. периоды без сбоев длительностью более 1 суток;
2. сбои без явной внешней причины;
3. сбои с указанием причины (чаще всего механические повреждения, метеорологические причины или вмешательство посторонних лиц).

Априорно предполагалось, что сбои без явной внешней причины (категория 2) с большей вероятностью вызваны возмущениями космической погоды. Было проведено сопоставление периодов сбоев с различными типами геомагнитных возмущений с помощью четырёх независимых статистических тестов, основанных на разных принципах. Для оценки геомагнитной возмущённости использовались геомагнитные индексы авроральной активности AE и межпланетной магнитной облачности EI, а также спектральная плотность геомагнитных пульсаций типа Pc5, зарегистрированных на близлежащей магнитной обсерватории «Ловозеро» (IAGA-код LOZ, Мурманская обл., рис. 1). Анализ показал, что вероятность появления сбоев растёт с уровнем геомагнитной активности. При



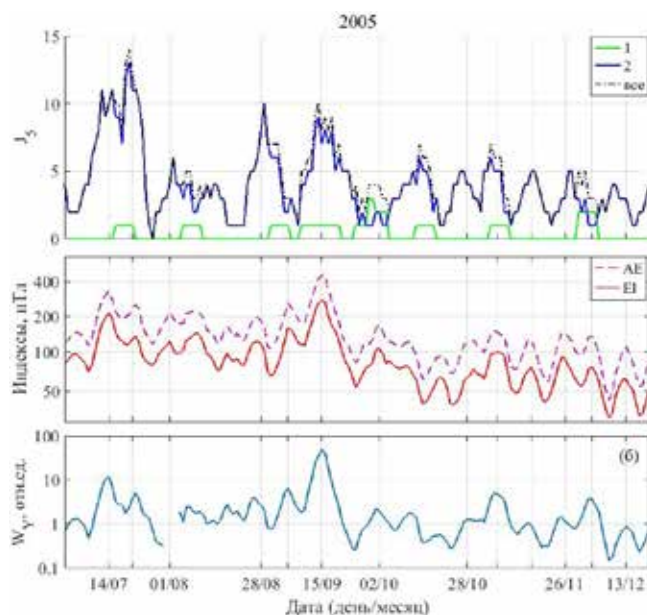


Рис. 2. Частота сбоев категорий 1, 2 и событий всех трех категорий (верхний график), геомагнитные индексы AE и E1 (средний график) и спектральная плотность геомагнитных пульсаций типа Pc5, зарегистрированных на магнитной станции LOZ, за период июль–декабрь 2005 г. [подготовлено с участием авторов].

этом, значимыми оказываются интегральные, за 2–4 дня, значения геомагнитных индексов, что соответствует средней продолжительности геомагнитных бурь. Важным результатом явилось и то, что сбои категории 3, причина которых была явно указана в архиве, не обнаруживают отличий в статистической связи с геомагнитной активностью. Возможными объяснениями этого могут служить как технические факторы, связанные с неточностями в описании причин, так и физические факторы, связанные с косвенным влиянием геомагнитной активности через погоду. На рис. 2 приведены графики изменчивости геомагнитной активности и частоты сбоев железнодорожной сигнальной автоматики за июль–декабрь 2005 год. На графике отчетливо видно совпадение всех максимумов авроральной активности и локальной геомагнитной возмущенности с максимумами частоты аномальных событий.

Анализ амплитуды ГИТ (напр., [23; 24]) и сбоев на железной дороге показывает, что источником самых сильных возмущений является авроральный овал, а именно, область дискретных высыпаний, которая тяготеет ближе к экваториальной границе овала. При этом важно отметить, что чем сильнее геомагнитное возмущение, тем на более низкие широты смещается авроральная зона. Таким образом, критической задачей является воз-

можность прогноза положения овала и авроральных высыпаний. В этой связи был разработан онлайн-сервис краткосрочного прогноза интенсивности и пространственного распределения полярных сияний (рис. 3). Входными параметрами являются данные в реальном времени с межпланетных спутников, расположенных в точке либрации L1, что обеспечивает прогноз с горизонтом 30–70 мин. В основе разработанной системы лежит эмпирическая математическая модель OVATION-Prime [25], устанавливающая статистические связи между параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоками авроральных частиц. Было показано, что доля подтвержденного прогноза сияний составляет более 86 % [26; 27].

1.2. Подверженность глобальных систем спутниковой навигации в авроральной области геомагнитной активности

Транспорт в значительной степени зависит от наличия других критически важных инфраструктур, таких как системы энергоснабжения, сигнализации, связи и навигации для операций и определения местоположения, и предыдущие исследования показали, что эти технологии могут быть нарушены во время космической погоды. Благодаря внедрению цифровых технологий на железных дорогах, таких как большие данные [28],

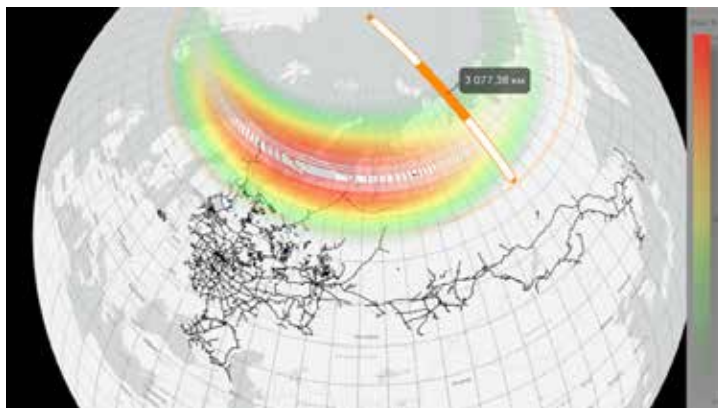


Рис. 3. Пример моделирования положения аврорального овала и интенсивности полярных сияний онлайн (<http://aurora-forecast.ru>).

обслуживание 4.0 [29], Интернет вещей (IoT) [30], киберфизические системы [31], также могут быть сбои в работе другого цифрового электронного оборудования [32]. Таким образом, технологические достижения увеличили риск неблагоприятных последствий, вызванных солнечной бурей. Остановимся более подробно на воздействии космической погоды на системы спутниковой навигации.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используют передачу сигнала в диапазоне от единиц до десятков ГГц от магнитосферного спутника. Область магнитосферы, где сосредоточено максимальное количество навигационных спутников, включает геостационарную орбиту (расстояние до центра Земли $6,6RE$, где RE – радиус Земли) и менее высокие орбиты. Сама спутниковая электроника подвергается воздействию быстрых заряженных частиц, прежде всего, электронов радиационных поясов, и может повреждаться во время резких возрастаний электронных потоков. Но количество навигационных спутников в настоящее время настолько велико, что повреждение или даже потеря одного из спутников может только незначительно сказаться на качестве навигации в большинстве районов. Тем не менее, вопрос о росте ошибки, связанной с уменьшением числа спутников для конкретной точки приёма, требует отдельного исследования, как и моделирование потери сигнала одновременно от нескольких спутников в условиях экстремальных возрастаний потока электронов. Современные системы навигации основаны на использовании нескольких систем, включая ГНСС: GPS (США), ГЛОНАСС (Российская Федерация), Galileo (Евросоюз), BeiDou/Compass (КНР).

В режиме автономной навигации погрешность позиционирования составляет единицы метров. Рассмотрим физические механизмы влияния возмущений космической погоды на точность приёма навигационного сигнала. При всем разнообразии эффектов они укладываются в следующие основные группы:

1. ухудшение отношения сигнал-шум из-за природных шумов в рабочем диапазоне излучателя;
2. повреждение передающей аппаратуры потоками быстрых заряженных частиц;
3. возмущения на пути распространения от передатчика к приёмнику, прежде всего за счёт ионосферных неоднородностей.

Источником первой группы искажений являются возрастания потока солнечного радиоизлучения во время вспышек. Повреждения аппаратуры на магнитосферных спутниках, орбита которых лежит внутри магнитосферы Земли, связаны с возрастаниями потоков быстрых заряженных частиц как солнечного, так и магнитосферного происхождения. Максимальные амплитуды ионосферных неоднородностей связаны с зоной полярных сияний и, прежде всего, их дискретных форм.

Таким образом, возможные космические источники ошибок в работе навигационного оборудования связаны с солнечными вспышками, солнечными протонными и электронными событиями, возрастаниями потоков быстрых электронов в магнитосфере и мощными авроральными возмущениями. Наиболее сильно эффекты, связанные с заряженными частицами и ионосферными неоднородностями, проявляются во время сильных магнитных бурь, когда не только растут амплитуды возмущений, но и происходит сме-



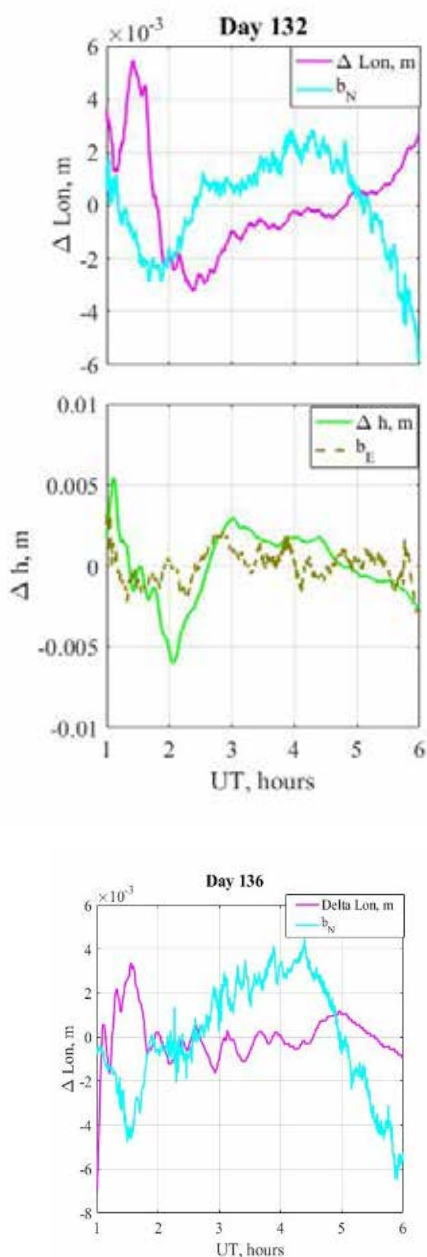


Рис. 4. Примеры согласованных вариаций ошибки позиционирования по долготе (сверху) и высоте (снизу) на базовой станции SVTL (60.5о СШ, 29о ВД, Ленинградская обл.) и вариаций магнитного поля на станции NUR (60.5о СШ, 25.5о ВД, Финляндия) во время главной (слева) и восстановительной (справа) фаз магнитной бури 12 мая 2021 г. Амплитуда вариаций магнитного поля нормирована по амплитуде вариаций смещения [подготовлено с участием авторов].

щение максимума возмущений в область средних широт [33].

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, включая и частотный диапазон сигналов ГНСС (1–2 ГГц). Это приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум при приеме сигнала

со спутника. Статистический анализ влияния солнечных вспышек на отношение сигнал/шум показал, что наиболее уязвимыми оказываются приёмники, работающие на частотах L2/L5, а качество сигнала на частоте L1 меняется мало [34]. При этом увеличение числа спутников для этого вида помех не приводит к существенному улучшению ситуации, так как рост шума, связанного со вспышкой, действует одновременно на все видимые спутники [35]. Существенное улучшение отношения сигнал/шум произошло за счёт увеличения мощности полезного сигнала на новых поколениях спутников, это позволяет сохранить работоспособность для вспышек с потоком радиоизлучения, превышающим 20 000 единиц, которые наблюдаются от 1 до нескольких раз в год в зависимости от фазы солнечного цикла [34]. Сравнительный анализ влияния вспышек 2011 и 2017 гг., выполненный в работе [36], показал существенное ослабление влияния вспышек солнечного радиоизлучения для новых более мощных систем.

Для проверки гипотезы влияния геомагнитной активности на точность геопозиционирования использовались данные базовых станций ГНСС в авроральных и субавроральных широтах. Временное разрешение составляло 30 с. Стандартная первичная обработка позволила компенсировать большую часть ионосферных возмущений. Для базовых станций число спутников во всех случаях составляло 15 или больше. Для проверки влияния на точность геопозиционирования было выбрано 4 группы дней по типам геомагнитных возмущений, для которых использовались следующие коды:

1. отсутствие возмущённости;
2. геомагнитные бури;
3. авроральные суббури большой интенсивности;
4. солнечные радиовспышки.

Для контроля пониженной магнитной активности (код 0) рассматривались дни, удовлетворяющие следующим условиям: отсутствие солнечных радиовспышек, отсутствие магнитных бурь с $Dst < -50$ нТл и непопадание в 4-дневное окно до бури, отсутствие авроральных возмущений с $AE > 100$ нТл. Для каждого возмущения по его типу и времени начала была определена наиболее вероятная географическая зона (минимальные и максимальные широты и долготы) максимального

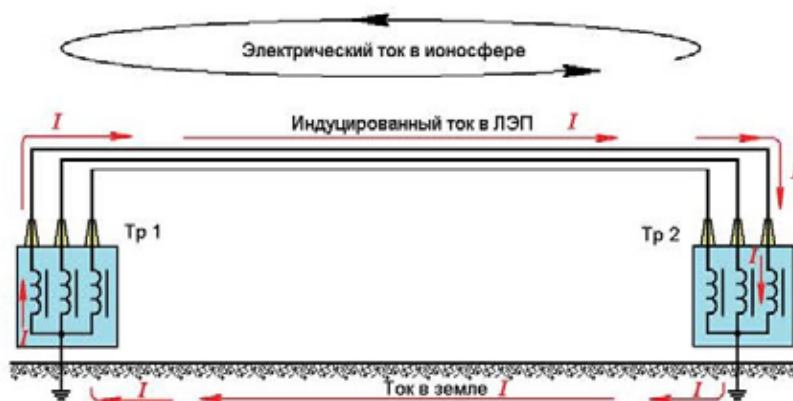


Рис. 5. Схема формирования и протекания ГИТ в ЛЭП [составлено с участием авторов].

эффекта. Всего за 2020–2023 годы было отобрано 38 событий с кодом 0, 10 событий с кодом 1, 38 событий с кодом 2 и 5 событий с кодом 3.

Анализ эффекта возмущений космической погоды на временных масштабах от нескольких минут до нескольких часов показал, что даже для базовой станции после применения алгоритма дифференциальной коррекции [37] в определённом по ГНСС кажущемся долготном и вертикальном смещении остаются вариации в диапазоне периодов 5–20 минут, совпадающие по частотам с вариациями геомагнитного поля на ближайшей магнитометрической станции. Амплитуды этих вариаций для базовых станций варьируются в пределах нескольких сантиметров (рис. 4).

Для использования результатов анализа сигнала на базовой станции в реальных приложениях необходимо решение следующих задач:

1. учёт разницы между реальным количеством спутников на месте и на базовой станции;

2. получение данных с более высоким временным разрешением для оценки возможности их применить к подвижному объекту (например, подвижному составу);

3. исключение используемого при стандартной предварительной обработке данных в сети ГНСС метода дифференциальной коррекции, так как он нацелен на задачи геодезии и максимально подавляет вариации внутри суток, что даёт несогласованные на разных временных масштабах результаты (между днями 0.1–10 м, внутри дня $<10^{-2}$ м).

1.3. Воздействие космической погоды на электроснабжение

Индуцируемые в поверхностных слоях земной коры вариации геоэлектрических токов замыкаются через заземлённые энергетические системы, вызывая появление ГИТ [38; 39] (рис. 5). В свою очередь, ГИТ приводят к перепадам напряжения, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП [40]. В настоящее время ГИТ стали постоянной угрозой для высокотехнологичных обществ и представляют серьёзную опасность для региональных высоковольтных электрических сетей, многие из которых пересекают национальные границы [41]. Для того, чтобы передавать большие объёмы энергии на большие расстояния, строятся все более протяжённые ЛЭП. Однако такие линии особенно подвержены воздействию больших ГИТ. Это обстоятельство делает электрические сети все более восприимчивыми к возмущениям космической погоды.

Зависимость железнодорожного сектора от электросетей представляет собой критическую уязвимость из-за его непосредственного воздействия на железнодорожную сеть, но сбой в электроснабжении также может повлиять на другие системы на станции. Другое железнодорожное оборудование, которое также может быть восприимчивым к ГИТ, — это придорожные кабели, телекоммуникационные и линейные цепи, резервные системы, батареи, системы мониторинга состояния, точечные цепи в коммутации [42].

При изучении возбуждения ГИТ в реальных высоковольтных линиях важным факто-



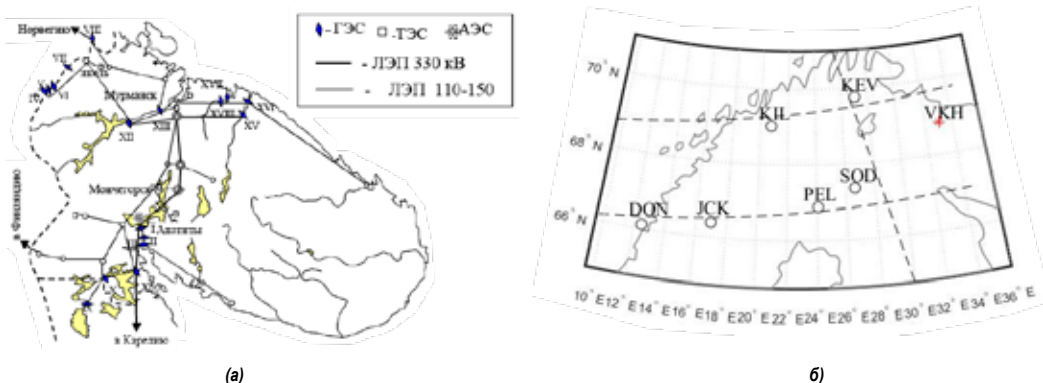


Рис. 6. Схема ЛЭП «Северный транзит» на Кольском полуострове: (а) расположение её северной подстанции «Выходной» (VKH), где проводятся измерения ГИТ; (б) расположение близлежащих геомагнитных станций на территории России и Финляндии [составлено с участием авторов].

ром оказывается непрерывная регистрация возбуждаемых токов в действующих сетях. В России существует система непрерывной регистрации ГИТ в магистральной линии «Северный транзит», проходящей от средних широт до арктической зоны. Система работает десять лет, и полученные данные о развитии ГИТ при различных уровнях геомагнитных возмущений позволяют оценить возможные значения ГИТ при экстремальных возмущениях. Максимальные значения ГИТ в нейтрали трансформатора достигали 140 А на самой северной подстанции «Выходной» во время события 29 июня 2013 года. Экстремально большое значение тока обуславливалось характером возмущения, цугом пульсаций типа Ps6 при развитии сильной суббури [43] и конфигурацией подключения силового оборудования на подстанции в указанный период. При развитии значительных ГИТ в нейтрали трансформатора существенно портится качество электроэнергии из-за генерации гармоник основной частоты. Именно гармоники могут являться причиной нарушений в тепловом режиме трансформатора, нарушать работу защитных реле, мешать работе аппаратуры в сетях потребителей электроэнергии. *Чтобы повлиять на работу трансформатора, достаточно возбуждения ГИТ интенсивностью всего несколько А.*

Расчёт возможных уровней ГИТ при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сетей для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, является исключительно актуальной задачей. Решение задач по снижению риска возникновения и уменьшению последствий

катастроф природного происхождения не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики для расчёта ГИТ в технологических системах, а требует и выяснения физической природы некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Для эффективного прогноза интенсивности и пространственного распределения ГИТ требуется доскональное изучение различных типов триггерных возмущений геомагнитного поля. Магнитные бури являются наиболее исследованным источником ГИТ. Нами было проведено исследование ГИТ, генерируемых вне бури, которое показало, что наиболее эффективными триггерами являются такие авроральные возмущения, как изолированные суббури и геомагнитные пульсации. Для этого анализировались одновременно данные системы регистрации ГИТ в нейтрали трансформатора на ЛЭП «Северный транзит» (Кольский полуостров, Республика Карелия) (рис. 6 (а)) и геомагнитные измерения, полученные на близлежащих геомагнитных станциях на территории России и Финляндии (рис. 6 (б)), за 2014–2018 годы.

В результате исследований были выделены следующие факторы, влияющие на ГИТ-эффективность пульсаций:

1. пространственный масштаб;
2. форма спектра;
3. поляризация.

Анализ данных нескольких геомагнитных станций позволяет исследовать пространственное распределение поля пульсаций. Было показано, что одна и та же амплитуда и частота возмущений может приводить к разным эффектам, обусловленным различным пространственным масштабом пульсаций

[44]. Влияние пространственного масштаба на ГИТ-эффективность наглядно проиллюстрировано на рис. 7. Из рисунка видно, что отношение амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации возрастает при увеличении пространственного масштаба поля пульсаций, сохраняющих амплитуду и частоту.

Было также показано, что спектральный состав УНЧ-пульсаций является значительным фактором эффективности при генерации ГИТ [45]. В этом отношении мультигармонические пульсации оказываются более эффективными по сравнению с одногармоническими – в случае первых отношение амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации в полтора раза больше. На рис. 8 справа сверху показаны спектры восточной Y-компоненты пульсаций и её производной по времени. Форма обоих спектров имеет ярко выраженный передний фронт, обеспечивающий эффективность генерации ГИТ. При этом спектр порождаемого геоиндуцированного тока (график справа снизу) имеет идентичную форму. Важно и то, что возмущения в геомагнитном поле и в ГИТ совпадают и по времени (графики слева).

Проанализированные интервалы Pc5/Pi3 пульсаций, зарегистрированных одновременно в геомагнитном поле и ГИТ, показали, что для ЛЭП, вытянутой в меридиональном направлении, связь спектральной мощности геомагнитных пульсаций и ГИТ проявляется сильнее для широтной (Y), чем для меридиональной (X) компоненты геомагнитного поля.

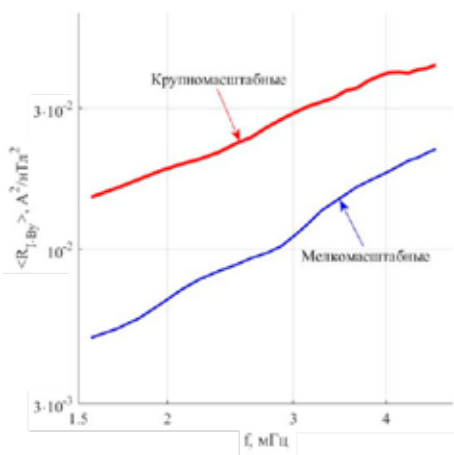


Рис. 7. Зависимость отношения амплитуды ГИТ к амплитуде пульсации от ее частоты для разных пространственных масштабов пульсаций [подготовлено с участием авторов].

Это выражается как в более высоком коэффициенте корреляции, так и в большем коэффициенте линейной регрессии. Иными словами, поперечная поляризация пульсаций относительно простираения ЛЭП в наибольшей степени влияет на генерацию в ней ГИТ [21].

Исходя из анализа трех выделенных факторов следует, что на высоких широтах внебуриевые пульсации с незначительными амплитудами являются важным источником потенциально опасных ГИТ с амплитудами в несколько десятков А. Действительно, как следует из рис. 8, максимальный размах амплитуд пульсаций всего в 25 нТл приводит к генерации ГИТ амплитудой 10 А. Напом-

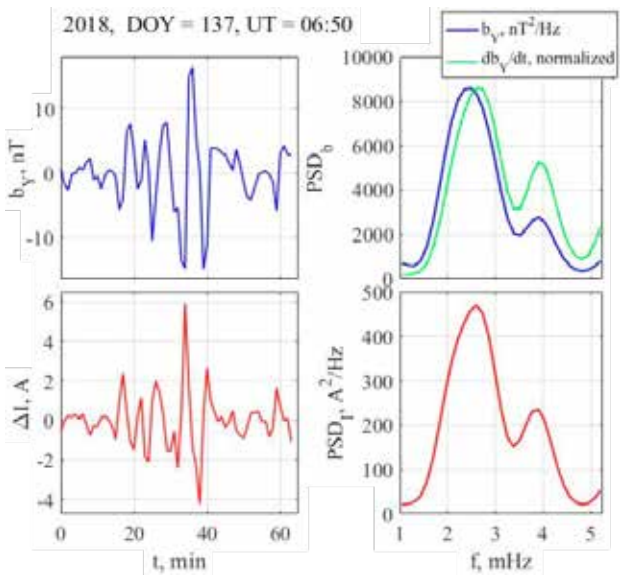


Рис. 8. Пример точного совпадения временной формы (слева) и спектров (справа) пульсаций геомагнитного поля (сверху) и ГИТ (снизу). На графике справа сверху показаны спектры возмущения Y-компоненты геомагнитного поля и ее производной по времени [подготовлено с участием авторов].



Рис. 9. Схема дистанционной регистрации ГИТ в ЛЭП дифференциальным методом. P1 и P2 – точки расположения магнитометров, расстояния указаны в метрах [подготовлена авторами].

ним, что 25 нТл – это характерная амплитуда спокойного суточного хода геомагнитного поля на средних широтах. Продолжительность исследуемых пульсаций может достигать нескольких часов. Столь длительное воздействие ГИТ величиной ~10 А на систему электроснабжения статистически оказывается более опасно, чем разовые всплески ГИТ величиной ~100 А в нейтрали, возникающие во время бурь и суббурь.

1.4. Прототип автономной градиентной установки для дистанционной регистрации ГИТ

Прямые измерения тока в нейтрали трансформаторов являются технически сложными, требуют больших затрат и физического подключения к трансформаторному оборудованию, что возможно далеко не всегда. В этой связи для оценки величины ГИТ крайне перспективными и востребованными являются дистанционные методы регистрации квазипостоянных токов в высоковольтных ЛЭП. Такой метод в настоящее время широко тестируется и внедряется по всему миру. Первые эксперименты проводились в 2016 году в Южной Африке [46], а затем измерительные

установки, основанные на этом методе, были смонтированы и апробированы в Великобритании, Испании, Португалии и других странах [47–50]. Идея метода состоит в установке двух трёхкомпонентных магнитометров в непосредственной близости от ЛЭП. Первый магнитометр устанавливается под линией, а второй – на расстоянии от 100 до 300 метров (рис. 9).

Вычисление разности между записями магнитометров позволяет устранить природные возмущения и получить вариации полного вектора магнитного поля от постоянного тока в ЛЭП. Применяя закон Био-Савара, который определяет вектор индукции магнитного поля, порождаемого постоянным электрическим током [51], постоянный ток (ГИТ) в ЛЭП рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R},$$

где B – измеренное поле,

R – расстояние до проводника с током.

Нами ведётся разработка установки, основанной на описанном методе. В качестве магнитометров были выбраны датчики на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной плёнкой. На магнитной обсерватории ГЦ РАН «Климовская», Архангельская обл. [52; 53], были испытаны трёхкомпонентные сборки указанных датчиков (рис. 10).

Сравнение данных датчиков со штатным комплектом магнитометрического оборудования обсерватории подтвердило, что чувствительность и точность датчиков достаточны для измерения токов, возникающих во время протекания средних и сильных геомагнитных возмущений (рис. 11). Как было сказано выше, потенциально опасные ГИТ



(а)



(б)



(в)

Рис. 10. Обсерваторские испытания датчиков: полевые измерения градиента поля (а), установка в вариационном павильоне вместе со штатным высокоточным векторным магнитометром (б), один из двух магнитометров градиентной установки (в) [фото авторов].

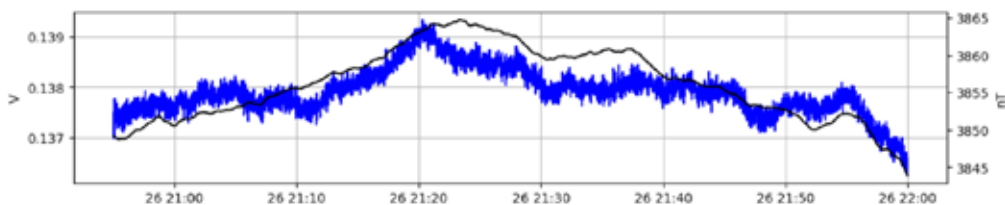


Рис. 11. Записи восточной Y-компоненты геомагнитного поля градиентной установкой (синяя [сложносоставная] кривая, шкала слева, В) и обсерваторским магнитометром (черная [однолинейная] кривая, шкала справа, нТл) [подготовлены с участием авторов].

характеризуются короткопериодными вариациями горизонтальных компонент магнитного поля от 10 нТл. В настоящее время ведётся разработка полевого варианта для апробации в реальных условиях на ЛЭП «Северный транзит» (Республика Карелия и Мурманская область), оборудованного датчиком измерения ГИТ через нейтраль трансформатора. Необходимым шагом будет являться калибровка градиентной установки на нормальный ток в исследуемой электроэнергетической системе.

2. Исследование крупных геологических структур и осадочных бассейнов на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных

Важность изучения осадочных бассейнов в АЗРФ обусловлена большими запасами полезных ископаемых (в первую очередь, углеводородного сырья) в этом регионе. Результаты исследований дают новую информацию для поиска и разведки нефтегазовых месторождений в континентальной части и на шельфе в российской Арктике. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородного сырья требуют развития необходимой транспортной инфраструктуры в регионе на достаточном уровне. В данном разделе приведены результаты изучения крупных геологических структур, осадочных бассейнов и построенные на их основе геоинформационные продукты. Несомненно, эти результаты должны учитываться при развитии и проектировании новых транспортных путей сообщения в АЗРФ, которые необходимы при реализации проектов как на стадии разведки месторождений, так и на стадии их эксплуатации.

Раздел Мохоровичича (Мохо) – одна из важнейших границ в недрах Земли, для которой характерны сильные изменения всех физических параметров, поэтому знание глубин залегания раздела Мохо чрезвычайно важно для многих геофизических моделей

и для понимания строения и динамики литосферы. Прямые данные о глубине Мохо можно получить только из сейсмических исследований, покрытие которых сильно неоднородно, а в восточной части АЗРФ, которая является крайне труднодоступной территорией, они практически отсутствуют. Новая карта Мохо была построена для восточной части российской Арктики (регион 60–75 °СШ, 110–190° ВД) [54]. Данный регион был выбран как наименее изученный в черте АЗРФ, поэтому представляет особый интерес. Карта основана на совместной инверсии различных геофизических полей, в первую очередь, поля остаточных аномалий и вертикальных градиентов силы тяжести. Исходная карта [55] была скорректирована в соответствии с этими полями с дополнительными ограничениями из нескольких сейсмических профилей. Новая модель Мохо (рис. 12 (б)) была детально сопоставлена с исходной моделью (рис. 12 (а)) и демонстрирует некоторые принципиальные особенности, отсутствовавшие ранее.

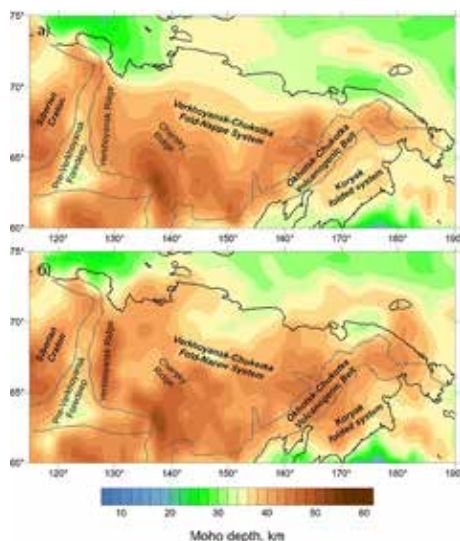


Рис. 12. Исходная карта глубины Мохо (сверху) и скорректированная карта Мохо (снизу), глубины от уровня моря [61] [подготовлены с участием авторов].

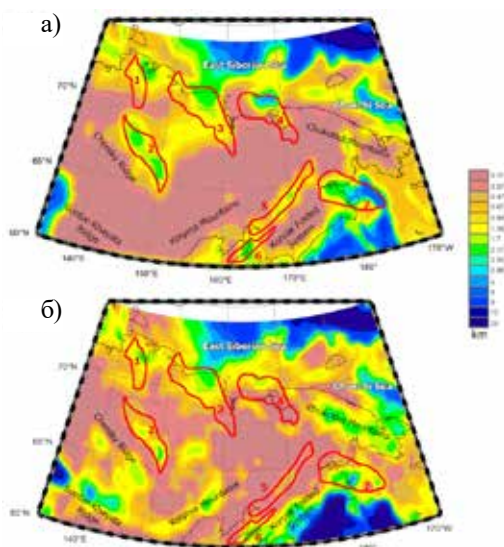


Рис. 13. Исходная модель осадочного чехла (сверху, а)) и новая модель осадочного чехла, полученная с использованием подхода декомпенсационных аномалий (снизу, б)). Красными контурами с цифрами обозначены анализируемые осадочные бассейны: 1 – Тастахский, 2 – Зырянский, 3 – Приморский, 4 – Чаунский, 5 – Пенжинский, 6 – Пусторецкий, 7 – Анадырский [61] [подготовлены с участием авторов].

Так, в новой модели под Верхоянским хребтом находится корень литосферы глубиной 47 км по сравнению с относительно небольшим понижением Мохо в исходной модели. Обнаружено значительное отличие в глубине Мохо (от 25–40 до 38–45 км) в северной континентальной части района исследований и на шельфе. Мы предполагаем, что это утолщение земной коры связано с андерплейтингом из-за активности плюма, имевшей место ранее. Также получена новая информация о глубине Мохо в акваторной части Чукотского микроконтинента и под расположением Анадырско-Корякской складчатой системы.

Структура осадочных бассейнов изучалась в той же восточноазиатской арктической зоне. В результате расчёта декомпенсационных аномалий силы тяжести была получена новая модель мощности осадочных отложений для восточного сектора АЗРФ [56], которая демонстрирует существенные новые детали о структуре, площади и плотности осадочных бассейнов по сравнению с результатами геологических исследований. В частности, новые данные о мощности осадочного чехла были получены для Зырянского, Анадырского, Чаунского и других осадочных бассейнов (рис. 13).

Для циркумполярной Арктики была получена новая модель геотермального теплового потока на основе инверсии сейсмических и магнитных данных [57]. Для построения новой карты теплового потока для исследуемого региона в качестве начального приближения был использован каталог Международной комиссии по тепловому потоку и две теоретические модели предшественников [58; 59]. Рис. 14 демонстрирует сравнение компиляции исходных моделей (рис. 14 (а)) с новой моделью (рис. 14 (б)). Новая карта позволяет обнаружить некоторые особенности, которые не были идентифицированы ранее – в частности, зоны повышенного теплового потока в Беринговом проливе, Чукотском море и остаточную аномалию в районе моря Лабрадор, связанную со Срединно-Лабрадорским хребтом, активным в палеогене. Также видно увеличение теплового потока в древней рифтовой зоне, разделяющей Восточную и Среднюю Сибирь.

Также, были построены модели упругих характеристик литосферы – изгибной жёст-

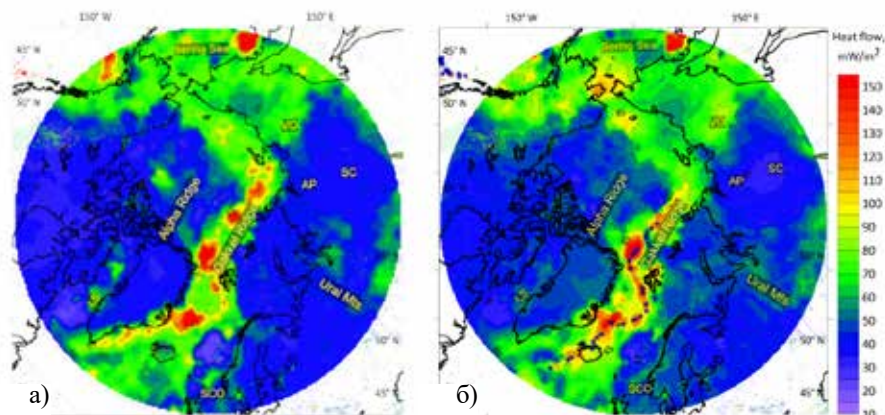


Рис. 14. Исходная (слева, а) и новая (справа, б) модели теплового потока для циркумполярной Арктики. Сокращениями обозначены: SC – Сибирский кратон; AP – Анабарское Плато; VO – Верхоянский ороген; SCO – Скандинавский каледонский ороген; LS – море Лабрадор [подготовлены с участием авторов].

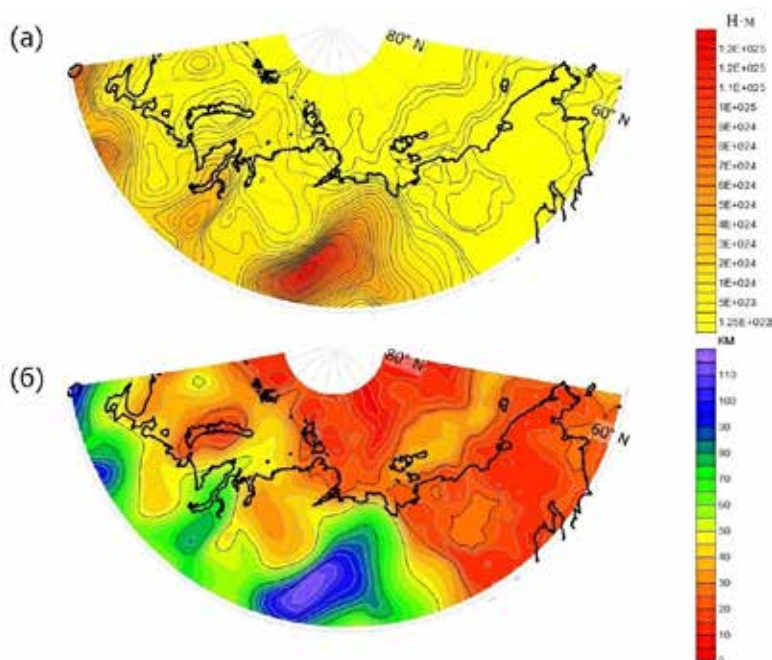


Рис. 15. Карты изгибной жёсткости (сверху) и эффективной упругой мощности (снизу) литосферы арктической зоны Российской Федерации [подготовлены с участием авторов].

кости (рис. 15 (а)) и эффективной упругой мощности (рис. 15 (б)) для литосферы по всей арктической зоне России. В данном исследовании использовался метод определения упругих параметров литосферы [60]. Он основан на кросс-спектральном анализе данных о гравитационном поле и приповерхностной нагрузке. Важным дополнением по сравнению с предыдущими работами было использование не только данных о топографии в качестве поверхностной нагрузки, но и плотностных неоднородностей осадочного чехла. Уточнённая модель этих неоднородностей была получена в работе [56].

По итогам проделанной работы был опубликован сборник геофизических полей для АЗРФ [61], включающий в себя вышеописанные результаты моделирования арктической литосферы, а также ряд данных, собранных из открытых источников (например, срезы сейсмотомографических моделей Арктики до раздела между верхней и нижней мантией). В ходе исследований по данному направлению, дополнительно были получены следующие цифровые массивы данных:

- гравитационный эффект коры и верхней мантии (гравитационное поле и его вертикальные градиенты);
- остаточные «мантийные» аномалии силы тяжести, аналогичные аномалии вертикаль-

ных градиентов и остаточная топография (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$);

- плотностная модель консолидированной коры (разрешение $1^\circ \times 1^\circ$);
- скорректированная модель верхней мантии: значения средней плотности для слоёв Мохо-75 км, 75–125, 125–175, 175–225, 225–275 и 275–325 км на сетках $1^\circ \times 1^\circ$;
- изменения плотности, обусловленные вариациями температуры и вариациями состава мантии.

3. Оценка сейсмической активности российской Арктики

АЗРФ на сегодняшний день является малоизученным регионом с точки зрения оценок сейсмической опасности. Существующие для разных частей этого региона оценки в ряде случаев значительно отличаются от реального положения дел [62]. При этом учёт сейсмической активности играет критическую роль при эксплуатации, планировании и развитии транспортных систем в регионе. В этом отношении актуальной является задача создания системно-аналитического комплекса для распознавания признаков мест возможного возникновения опасных сейсмических и других геодинамических событий в Арктике и расчёта сейсмической опасности и сейсмического риска для заданных территорий и объектов. Особое



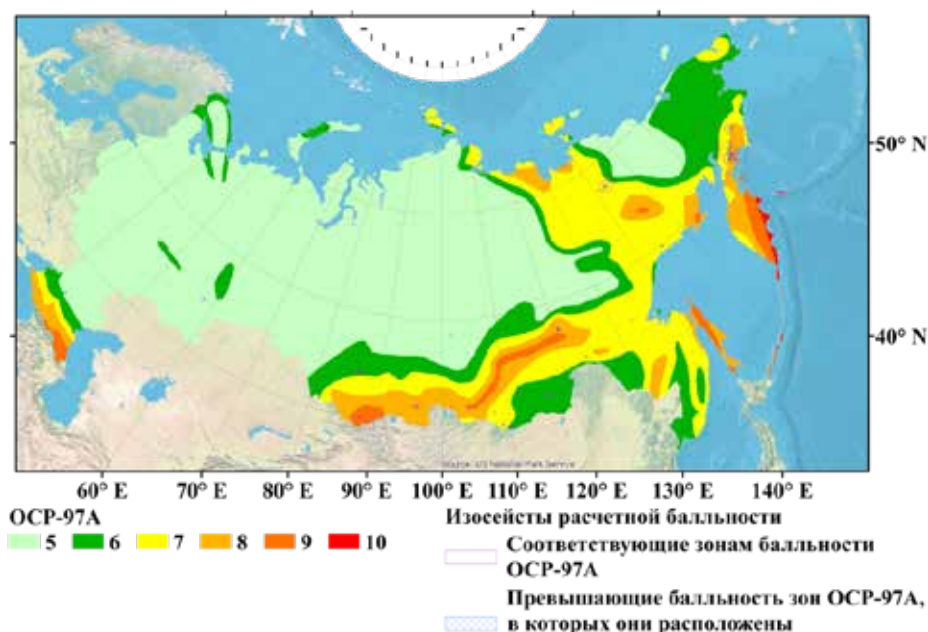


Рис. 16. Карта ОСП-97А и рассчитанные теоретические изосейсты [подготовлена с участием авторов].

внимание при этом уделяется исследованию таких линейных объектов, как железные дороги, автомобильные трассы, линии электропередач и трубопроводы.

В качестве начального этапа распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений в АЗРФ было проведено численное сравнение карт Общего сейсмического районирования (ОСР) [63] с воздействием от землетрясений, фактически состоявшихся после публикации карт. Было выполнено сравнение площади зон ожидаемой балльности на карте ОСП-97А с площадью изосейст от фактически произошедших землетрясений. Исследование показало, что площадь изосейст в среднем на порядок меньше, чем ожидается согласно карте ОСП-97А (рис. 16). Таким образом, в большинстве регионов России оценка сейсмической опасности в среднем может быть завышена как минимум в 10 раз. Это наблюдение особенно важно для АЗРФ, где на фоне весьма слабого фактического сейсмического воздействия значительные территории Кольского полуострова, архипелагов Новая Земля и Северная Земля, Новосибирских островов, полуострова Таймыр, а также севера Якутии и Чукотки отнесены к зонам с балльностью 6 и выше. В указанной статье [62] были предложены пути совершенствования оценок сейсмической опасности, необходимых

при системном анализе геофизических процессов в Арктике.

В процессе подготовки наиболее полного каталога землетрясений АЗРФ авторами и их коллегами были выявлены существенные различия в каталогах Международного сейсмологического центра (ISC) и Единой геофизической службы РАН (ЕГС РАН). В этой связи каталог ISC был дополнен событиями из каталога ЕГС РАН и других российских локальных источников. Для этого был создан оригинальный алгоритм объединения каталогов землетрясений, основная задача которого – идентификация образующихся дублей и их отделение от афтершоков. Алгоритм базируется на авторской модификации метода ближайшего соседа [64; 65] для дублей. За его идейную основу взят тот факт, что в отличие от афтершоков дубли не имеют причинно-следственной связи. Для событий из двух каталогов строится взаимно-однозначное соответствие, после чего классификация землетрясений на уникальные и дубли производится с помощью евклидовой метрики «типа Фролиха». Таким образом, разработанный алгоритм позволяет автоматизировано объединять любое количество каталогов землетрясений [66].

Эффективность алгоритма впервые была продемонстрирована на примере объединения каталогов ANSS (USGS) и JMA (Japan

Meteorological Agency) афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку 2011 года (рис. 17). Позже в 2021–2022 гг. алгоритм был развит и модифицирован для его непосредственного применения к данным по АЗРФ. В результате впервые в 2022 году был создан наиболее полный объединённый каталог землетрясений восточной части АЗРФ [67] и два каталога, в своём объединении охватывающие всю западную часть АЗРФ, – объединённый каталог западного сектора АЗРФ и каталог Хребта Гаккеля [68]. Все три созданных авторских каталога снабжены своей унифицированной магнитудной шкалой. Каталоги западного сектора АЗРФ и Хребта Гаккеля разделены на два множества, упорядоченных по времени, так как их унифицированные магнитуды взаимно не совместимы.

На рис. 18 показаны события из созданных объединённых каталогов для западного и восточного секторов АЗРФ, которые интегрируют в себе все доступные сейсмические данные из ISC, российских региональных каталогов ЕГС РАН и ряда других источников. Каталог восточного сектора АЗРФ (рис. 18 (б)) содержит 23 254 события за 1962–2020 годы, из которых 7 781 из ISC и 15 473 из российских источников [69]. Для созданного каталога западного сектора АЗРФ (рис. 18 (а)) была проведена работа по идентификации и удалению взрывов и других событий, не являющихся землетрясениями. За период 1998–2020 годов, когда с высокой степенью достоверности были удалены все такие события, каталог содержит 2 126 записей. Всего за период 1963–2022 годов каталог содержит информацию о 4 629 сейсмических событиях.

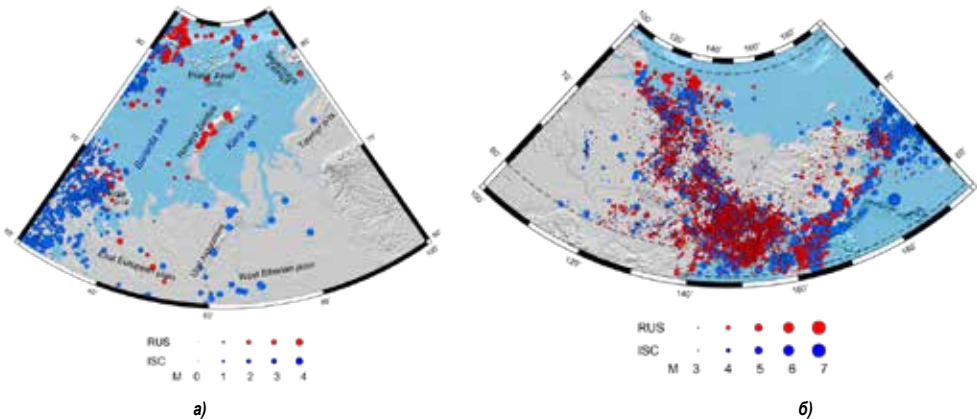


Рис. 18. Карты эпицентров объединённых каталогов АЗРФ: (а) – западный сектор за период 1998–2020 гг.; (б) – восточный сектор за период 1962–2020 гг. Синим обозначены землетрясения из каталога ISC, красным – события из российских и других источников [составлено с участием авторов].

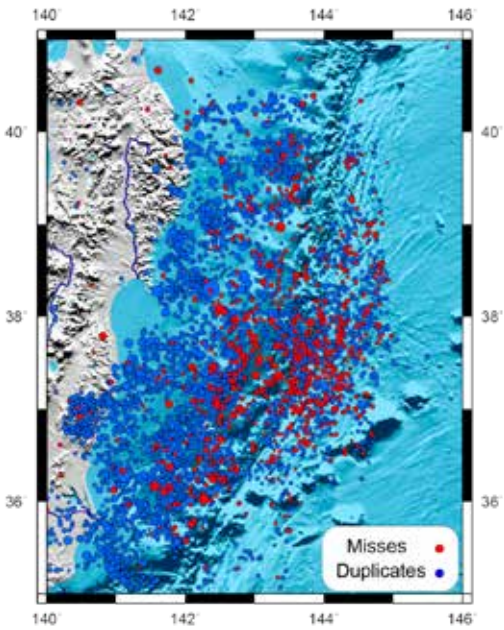


Рис. 17. Карта эпицентров каталога ANSS афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку 2011 г. Красным цветом показаны события, отсутствующие (пропущенные) в каталоге JMA [разработано с участием авторов].

Каталог Хребта Гаккеля содержит около 17 000 событий.

Дальнейшие исследования были связаны с пространственной оценкой сейсмической активности по данным из созданных каталогов землетрясений. Как мера энергии при этом использовалась указанная выше авторская модифицированная магнитуда. Для восточного сектора АЗРФ были рассчитаны значения коэффициентов закона повторяемости Гутенберга-Рихтера на регулярной сетке с шагом 0.1° по широте и долготе. На рис. 19 (а) приведена карта локальных значений представительной магнитуды. По этим дан-

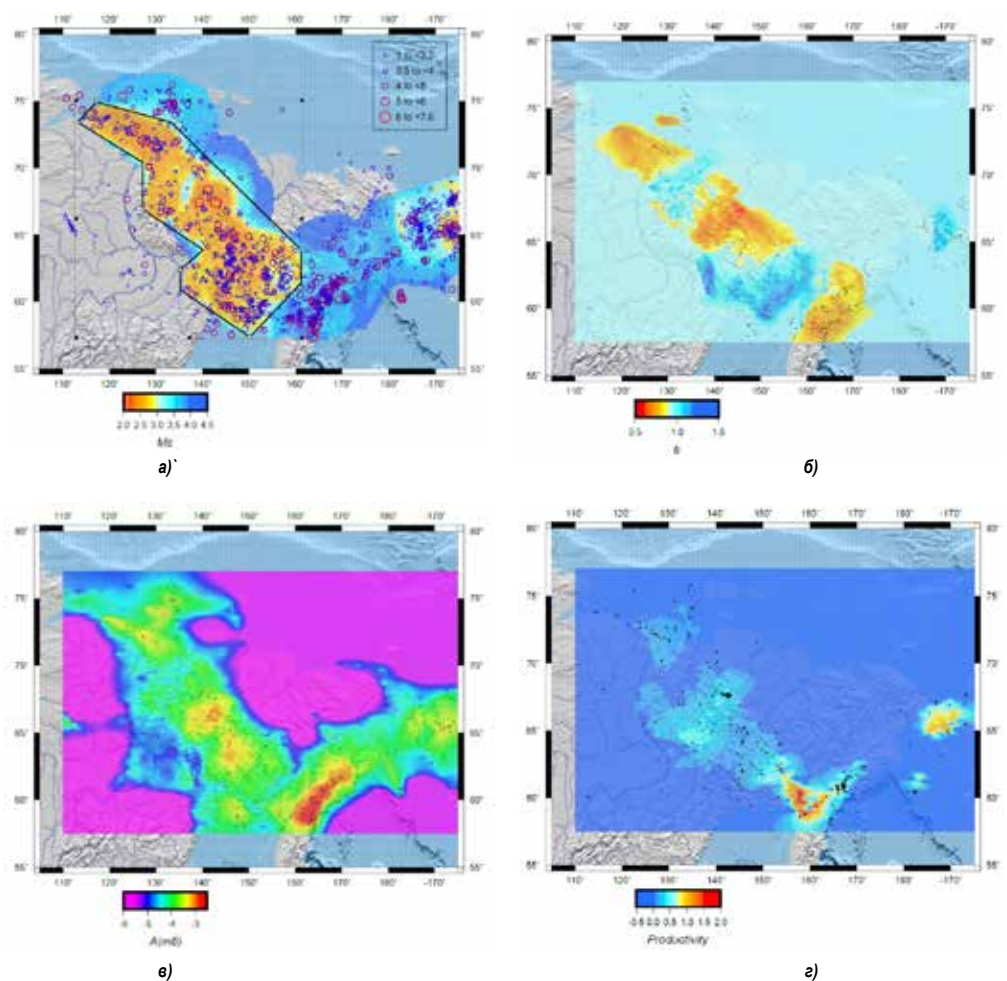


Рис. 19. Оценка сейсмической активности восточного сектора АЗРФ по данным объединённого каталога землетрясений АЗРФ [подготовлена с участием авторов]:
 (а) – карта магнитуды полной регистрации M_s за период 1982–2020 гг., построенная мульти-масштабным методом (многоугольником отмечена область, где для вычисления параметров сейсмичности используются землетрясения с $M \geq 3.0$, на остальной территории используются землетрясения с $M \geq 4.0$);
 (б) – вариации наклона графика повторяемости (значения b – value привязаны к среднему положению землетрясений выборки; $R = 300$ км, $N_{min} = 50$ событий; в местах низкой сейсмической активности используется региональное значение наклона графика повторяемости $b = 0.924$);
 (в) – сейсмическая активность $a(m6)$ в логарифмической шкале (вариации сейсмической активности для любого уровня магнитуды вычисляются в соответствии с локальным значением наклона графика повторяемости $a(M) = a(M_s) - b(M - M_s)$);
 (г) – средняя продуктивность в кругах с радиусом $R = 300$ км, $DM = 1$ (черными кругами отмечены эпицентры землетрясений, которые использованы для расчета продуктивности).

ным были определены границы области, в которой в качестве представительной магнитуды может быть принято значение $M_s = 3.0$. В остальной части региона это значение составляет $M_s = 4.0$.

Методом ближайшего соседа было проведено разделение каталога на фоновые и зависимые события. Дальнейшая оценка параметров сейсмичности проводилась по каталогу фоновых событий. На сетке с шагом 0.1° по широте и долготе был вычислен параметр сейсмической активности $a(m4) = \log_{10} v$, где v – оценка числа землетрясений с магнитудой $M \geq 4.0$, вычисленная с учетом фрактальной

размерности распределения эпицентров. В итоге были построены карты вариаций наклона графика повторяемости (b -value) (рис. 19 (б)) и параметра сейсмической активности $a(m6) = a(m4) - 2b$ (рис. 19в). По методике [70] был произведён расчёт продуктивности каждого землетрясения в полосе магнитуд $DM = 1$. В результате, в кругах радиуса $R = 300$ км были рассчитаны и картированы значения средней продуктивности (рис. 19 (г)). Это позволило определить региональные оценки параметров закона Омори-Утсу, по которым была сформирована ГИС-ориентированная база данных.

Для моделирования сейсмического процесса в исследуемом регионе полезным является использование синтетического каталога землетрясений. Такой каталог является новым искусственно созданным множеством аналогов сейсмических псевдособытий, сгенерированных по аналогии с записями реального каталога. Синтетический каталог воспроизводит основные свойства реального каталога и генерируется на произвольный интервал времени. Нами был разработан метод построения синтетического каталога землетрясений, который основан на синтезе трех групп подходов к оценке геодинамической опасности. Основная идея метода состоит в предположении о том, что закон Гутенберга-Рихтера выполняется на региональном уровне, а возможные локальные отклонения компенсируются при осреднении по всему региону. Поэтому времена и магнитуды фоновых событий в синтетическом каталоге определяются для всего региона независимо от их местоположения. Параметры псевдособытий генерируются в соответствии с региональным законом повторяемости, а их местоположение определяется как векторная случайная величина с заданным распределением по пространству в зависимости от магнитуды. Распределение строится для каждого значения магнитуды на основе локальных оценок закона Гутенберга-Рихтера.

Другое важное предположение состоит в том, что наиболее сильные землетрясения происходят в ограниченном количестве зон в пределах рассматриваемого региона. Для определения этих зон использовались методы распознавания на основе системного анализа каталога землетрясений региона – FCAZ-распознавание [71]. Последнее исследование имеет важное самостоятельное значение как для уточнения сейсмического районирования АЗРФ, так и для ориентировки планирования строительства объектов повышенной ответственности, включающих в себя транспортные магистрали, морские и речные порты, аэропорты, железнодорожные и автовокзалы и т.д.

В-третьих, афтершоки вносят существенный дополнительный вклад в общую сейсмичность и сейсмическую опасность. За основу стохастического моделирования афтершоков в методе используется модель ETAS [72]. В этой модели сейсмический

режим интерпретируется суперпозицией последовательностей, убывающих во времени по закону Омори-Утсу. В пространственно-временном варианте модели ETAS [73] учитывается степенной закон убывания интенсивности афтершоков с расстоянием от эпицентра основного толчка. В ETAS постулируется, что число афтершоков у землетрясений одинаковой магнитуды одинаково. Однако установленный недавно закон продуктивности землетрясений [70] опровергает этот постулат, одновременно давая объяснение факту завышения прогнозируемой на будущие интервалы времени по модели ETAS интенсивности потока землетрясений. В применяемом методе используется модель ETAS-e [70; 74], в которой дополнительно учтён закон продуктивности землетрясений. Эта модель исправляет главный недостаток модели ETAS [74]. По указанной методике был подготовлен синтетический каталог землетрясений на условный период 1 000 лет для восточного сектора АЗРФ.

Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 5.5$ в восточном секторе АЗРФ было выполнено с использованием уже упомянутого выше алгоритма FCAZ [69; 75]. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из объединённого каталога землетрясений АЗРФ (рис. 18 (б)). Выбор магнитудного порога, начиная с которого эпицентры использовались в качестве объектов FCAZ-распознавания, проводился на основе анализа графиков повторяемости. Распознанные FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров исторических и инструментальных сильных землетрясений (рис. 20) и, в основном, приурочены к границам Евразийской, Северо-Американской и Охотоморской тектонических плит. В зоне контакта всех трёх плит и Охотоморской с Северо-Американской были выделены весьма крупные FCAZ-зоны, содержащие половину известных в регионе сильных землетрясений. FCAZ-зоны распознаны также в пределах хребта Черского, являющегося одной из основных геологических структур региона. В границах этого хребта известно достаточно большое количество инструментально зарегистрированных сильных землетрясений [67].



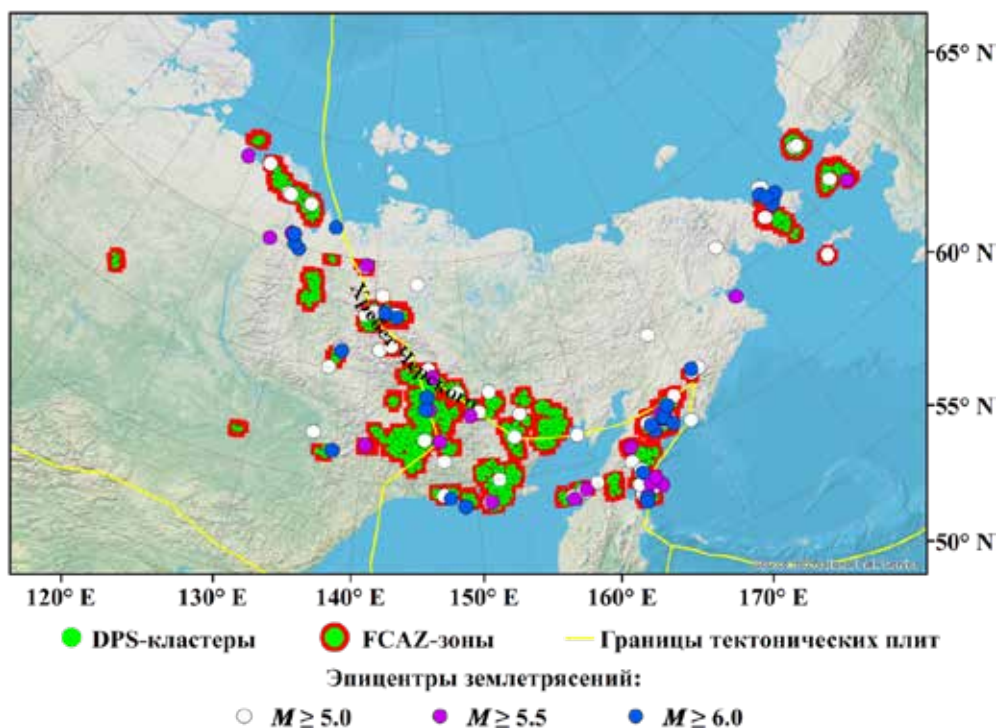


Рис. 20. FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$ в восточном секторе АЗРФ и эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$. Схема может быть рекомендована к использованию для ориентировки будущего строительства и эксплуатации транспортных магистралей [разработано с участием авторов].

4. Геоинформационное сопровождение системного анализа геофизических процессов в российской Арктике

Эффективным средством для комплексного анализа и комбинированной визуализации получаемых новых геолого-геофизических данных об арктическом регионе служат геоинформационные системы (ГИС). Важно, чтобы при этом обеспечивалось высокоуровневое хранение географических объектов с использованием объектно-реляционной системы управления базами данных. Применение современных технологий геопорталов позволяет обеспечить интерактивный онлайн-доступ к полученным научным результатам широкому кругу исследователей. Качественная визуализация представляет собой мощный инструмент в области моделирования и системного анализа и, как следствие, становится значимой частью обработки и менеджмента больших объёмов данных.

Описанные в предыдущих разделах исследования планомерно порождают новые данные по следующим крупным научным направлениям: геомагнетизм и космическая погода, строение земной коры и сейсмическая активность. По мере их получения расширяется общая, унифицированная база геопростран-

ственных данных об АЗРФ. Например, в базу были добавлены данные моделирования геотермального теплового потока, рассчитанные в рамках изучения строения земной коры в Арктике, карты глубин основных геологических границ (граница Мохоровичича, верхней мантии, подошвы осадков и граница литосфера-астеносфера), которые использовались при расчётах этой новой модели, изначальная мощность осадочного чехла, основанная на компиляции данных моделей для акваторий и суши, эффективная упругая мощность литосферы, объединённый каталог землетрясений российской Арктики и многие другие.

Любая вспомогательная геолого-геофизическая информация, привлекаемая в ходе исследований, также включается в базу. К таким данным, например, относятся данные по геологии (прогнозно-минерогеническая карта масштаба 1:2 500 000, геологическая карта масштаба 1:2 500 000, карта мощности осадочного чехла), геодезии (топографическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 100 000; цифровые модели рельефа ЕТОРО и GEBCO), гидрологии (карты перераспределения объёмов снега, временной изменчивости снегозапаса, стока подземных

Аномальная составляющая магнитного поля, dT , нТл

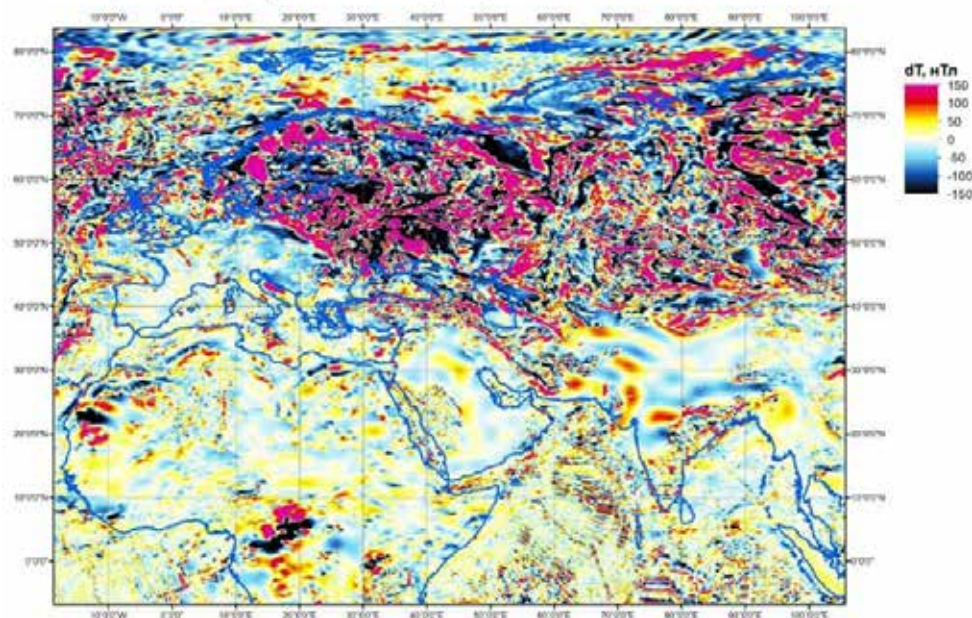


Рис. 21. Фрагмент карты аномальной составляющей магнитного поля, построенной по модели [76] с участием авторов.

вод, суммарного стока речных вод, снегозапаса, вариаций речного стока, стока талых вод, потенциального ледяного покрова, установления и таяния снежного покрова), сетям геофизических наблюдений (карты распределения обсерваторий и станций геофизических наблюдений), гляциологии (карты границ вечной мерзлоты, степени оледенения территорий, толщины ледяного покрова, температурного режима в зоне вечной мерзлоты), месторождениям полезных ископаемых (карты крупных и уникальных месторождений полезных ископаемых), почвоведению (карты классов и типов почв), геофизике (карты аномального магнитного поля Земли; эпицентров землетрясений; аномалий геоида; аномалий силы тяжести; глубины до поверхности Мохоровичича; скоростей сейсмических волн и др.), биогеографии (карты заболоченности территорий, растительности, биоклиматических зон и растительных зон). В качестве примера на рис. 21 приведены ГИС-слои данных о литосферном магнитном поле Земли согласно модели разложения поля по сферическим гармоникам до 1050 степени [76]. Модель построена по измерениям магнитного поля со спутников CHAMP и Swarm, а также по данным о приповерхностных скалярных аномалиях, полученных в ходе локальных морских и наземных съёмок маг-

нитного поля. Итоговые данные представлены на всю планету с шагом $0,1^\circ$ по широте и долготе. В базу геоданных включена информация об аномальном магнитном поле и его трех ортогональных компонентах. Для каждой из составляющих имеется вариант поля на высоте 0 километров и пересчитанный на высоту 5 километров.

Дополнительно в указанном ГИС-хранилище был создан раздел «Направления развития Арктики», содержащий пространственную информацию об уже созданных и планируемых объектах инфраструктуры АЗРФ. Представленные в этом разделе слои данных составлены в соответствии с указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» и включают транспортные объекты (порты, аэропорты, автомобильные дороги и железные дороги), объекты энергетики, развивающиеся туристические объекты, объекты науки и образования. На данный момент всего в базу включено более 200 слоёв геоданных по 46 категориям.

Для широкого доступа к накапливаемым данным был разработан и продолжает развиваться геопортал «Арктика» (<https://arctic-gis.gcra.ru/>) с обширным пользовательским интерфейсом. Среди прочего в него добавлены



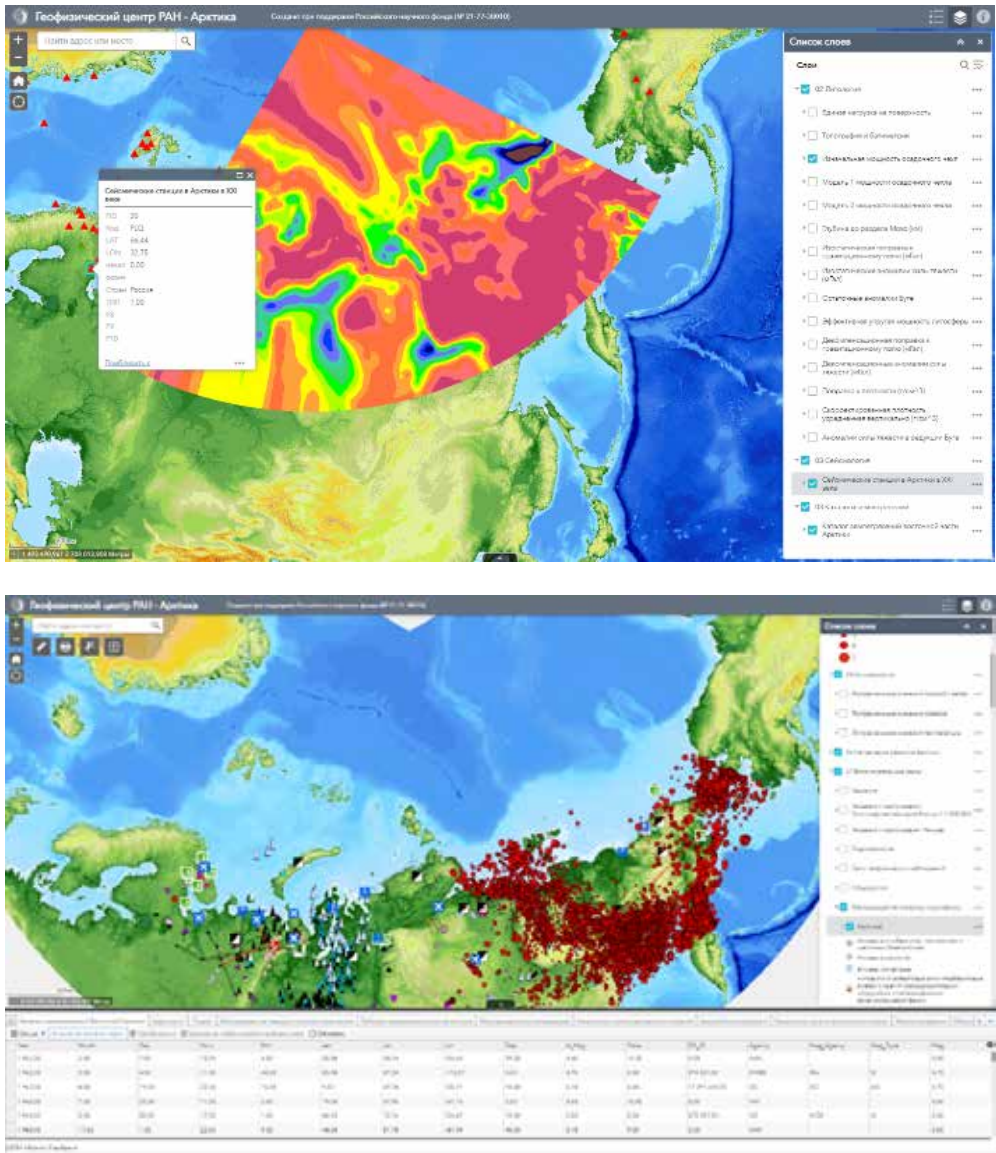


Рис. 22. Общий вид интерфейса геопортала «Арктика»: сверху – карта мощности осадочного чехла и вызов контекстного меню с атрибутивной информацией о выбранной сейсмической станции; снизу – работа с атрибутивной таблицей слоя с каталогом землетрясений Арктики. Список доступных слоёв представлен в меню справа [снимки экрана портала представлены авторами].

следующие инструменты взаимодействия с пространственными данными: «Измерение расстояний», позволяющий измерять линейное расстояние между двумя или несколькими объектами, а также измерять площадь пространственных объектов; «Координаты», позволяющий уточнить координаты того или иного объекта на карте; «Отбор», который позволяет выбрать определённый тип данных внутри одной категории, а также обеспечивает вывод атрибутивной таблицы, содержащей только тот тип данных, который интересует пользователя (рис. 22).

Концепция интерактивных сферических визуализаций (ИСВ) – это изучение планетарных процессов и явлений и их репрезентативное представление в интерактивной форме с разнообразных устройств без применения специализированных ГИС-инструментов. На сегодняшний день ИСВ активно развиваются в рамках парадигмы «Digital Earth» / «true-3D» по направлениям аппаратно-программных комплексов со сферическим экраном и виртуальных глобусов. По адресу data.sph.gcras.ru был развернут публичный файл-сервер типа NAS на базе открытой операционной LINUX-



(а)



(б)

Рис. 23. Иллюстрации воспроизведения ИСВ «Автомобильные дороги» и «Железные дороги», представленные посредством комплекса ORBUS (а), а также ИСВ «Аэропорты» и «Морские порты», выполненные с помощью ORBUS Web (б) [предоставлены авторами].

системы OpenMediaVault. Раздел тематических данных по АЗРФ располагается по адресу data.sph.gcras.ru/Arctic. Сервер предоставляет доступ к структурированным исходным данным для клиентов ИСВ по высокоуровневым прикладным протоколам FTP и SMB в режиме онлайн. Дополнительно хранилище является rsync-сервером, позволяющим выполнять синхронизацию файлов и каталогов по настраиваемому расписанию. Прототип единой геоинформационной системы ИСВ был апробирован путём воспроизведения сферических слайдов на сетевых клиентах ИСВ посредством клиент-серверного взаимодействия по принципам

выработанной архитектуры. На примере организации тематических данных по АЗРФ была реализована архитектура (набор каталогов, файлов и принципов взаимодействия с ними) серверной части системы ИСВ. Созданный файл-сервер организует унифицированный доступ к системе хранения контента для программных технологий геоинформационной системы ИСВ. Прототип единой геоинформационной системы ИСВ был апробирован клиентскими приложениями ИСВ, разрабатываемыми в ГЦ РАН: аппаратно-программным комплексом со сферическим проекционным экраном ORBUS (рис. 23 (а)) и веб-приложением типа «виртуальный глобус» ORBUS Web (рис. 23 (б)).



ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений наблюдаются на авроральных широтах [77; 78], поэтому особую опасность эти факторы предоставляют для безопасной работы технологических систем в АЗРФ, так как Российская Федерация располагает самыми протяжёнными нефтегазопроводами, линиями электропередач и транспортными магистралями. Несмотря на исключительную важность таких исследований, в отечественной нормативной документации влияние геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) на электроэнергетические системы и на надёжность работы электрооборудования до сих пор не учитывается. В то время как в большинстве исследований, связанных с космической погодой, основное внимание уделяется влиянию на электрические сети, гораздо меньше внимания обращалось на нарушения работы железнодорожного сектора [79], хотя механизм этого влияния пока недостаточно исследован [80].

Вместе с тем аномалии в системах сигнализации и контроля поездов, связанные с этим явлением, были неоднократно задокументированы [81]. Представленные в настоящей статье результаты подтверждают, что геомагнитная активность на высоких широтах – значимая причина, контролирующая появление сбоев в работе железнодорожной сигнальной автоматики [22]. Усовершенствование технической базы, нацеленное на обеспечение бесперебойной работы светофоров, сопровождается ростом сложности технологической инфраструктуры и приводит к пропаданию одних эффектов и возникновению новых. Однако общая физическая причина сбоев в работе сигнальной автоматики, связанная с возбуждением ГИТ в протяжённом проводнике, устранена быть не может.

Работа транспортных систем зависит и от других, потенциально подверженных воздействию космической погоды технологий, таких как энергоснабжение, связь, системы позиционирования, навигации и синхронизации времени. Поскольку при сильных бурях воздействие возмущений распространяется достаточно широко и носит планетарный характер, необходима координация усилий по прогнозу космической погоды, разработке мер по ослаблению прямых и кос-

венных воздействий возмущений на системы и службы, связанные с функционированием транспортных систем [42].

В работе продемонстрировано, что по статистике более слабые, но частые и продолжительные геомагнитные события порождают более опасные ГИТ, в отличие от редких, но сильных геомагнитных бурь. Ключевыми факторами, влияющими на ГИТ-эффективность указанных событий, являются их пространственный масштаб, форма спектра и поляризация. С точки зрения негативного воздействия ГИТ на системы электроснабжения, геометрия ЛЭП и её ориентация в пространстве имеют ключевое значение. Так, чем большую протяжённость имеет ЛЭП, тем интенсивнее наведённые токи, возникающие в ней в ходе геомагнитной активности, и это обстоятельство, несомненно, необходимо иметь в виду при проектировании новых сетей. Одним из решений, которое применяется в ряде скандинавских стран, может быть дробление ЛЭП на более короткие сегменты.

Для полномасштабного научного обоснования предупреждения негативного воздействия космической погоды на электроэнергетические сети необходимо развитие сети мониторинга ГИТ. В работе предложена перспективная автономная установка на основе градиентных магнитометрических датчиков, способная дистанционно обеспечивать измерение ГИТ, возбуждаемых в ЛЭП. Основываясь на результатах статистического и корреляционного анализа показано, что дистанционное зондирование ГИТ в высокоширотных ЛЭП посредством наблюдения геомагнитных возмущений характеризуется относительной ошибкой в пределах 1,5 % от размаха значений ГИТ за исследуемый период. Таким образом, внедрение таких установок в высокоширотную наблюдательную сеть внесёт существенный вклад в развитие системы оценки возможных негативных эффектов космической погоды и краткосрочного прогноза (за 0,5–1 час) возможности критических уровней ГИТ. Такой прогноз может быть использован операторами для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий.

Исследования пространственного распределения источников ГИТ показали, что

географически они тяготеют к экваториальной границе аврорального овала, что делает особо актуальным прогноз интенсивности высыпаний высокоэнергичных частиц и положения границ аврорального овала. Такой прогноз крайне важен и потому, что чем сильнее возмущение, тем на более низкие широты смещается экваториальная граница овала. Для этих целей была разработана онлайн-система (<http://aurora-forecast.ru>) на базе эмпирической математической модели OVATION-Prime и ГИС-технологий, обеспечивающая такой прогноз с горизонтом 30–70 мин и эффективностью более 86 %. Кроме того, система осуществляет компьютерное моделирование мгновенного положения аврорального овала и визуализацию пространственного распределения ретроспективных данных. При отображении на виртуальном глобусе исследуемые параметры накладываются на цифровую карту основных железнодорожных магистралей и других транспортных систем России.

Долговременный и оперативный прогноз доступности требуемых навигационных характеристик на период действия гелио-геомагнитного возмущения является наиболее спорным и сложным направлением модернизации ГНСС. Приведённые выше сведения показывают, что экстремальные факторы космической погоды могут стать причиной существенной деградации качества функционирования ГНСС и их функциональных дополнений.

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы. Стандартная процедура компенсации ионосферных возмущений не полностью подавляет возмущения, связанные с геомагнитными вариациями с периодами от минут до получаса (геомагнитные пульсации и бухты). Возможным источником этого явления является модуляция электронной концентрации в ионосфере потоками заряженных частиц, которые, в свою очередь, модулируются полем МГД-волны в магнитосфере. Этот эффект является дифференциальным по высоте, зависит от энергии частиц, в результате чего возникает «недокомпенсация» при использовании стандартных методов обработки кажущегося смещения положения базовой станции. Эффект возникает не для всех геомагнитных пульсаций одинако-

вой амплитуды и частоты. Для решения вопроса о практической значимости обнаруженного эффекта и целесообразности дальнейших исследований необходим анализ вариаций кажущегося смещения положения объекта, определённого по ГНСС, с учётом числа спутников и скорости перемещения приёмника, близким к реальному.

Новые сведения о мощности осадочного чехла и строении осадочных бассейнов в самом труднодоступном регионе континентальной АЗРФ – северо-восточной части Российской Федерации – представляют собой ценную информацию о строении и условиях формирования толщ осадочных пород в регионе, в том числе перспективных для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. В первую очередь, это важно для поисков залежей углеводородного сырья на шельфе Северного Ледовитого океана, а также месторождений различного минерального сырья в континентальной части АЗРФ – месторождений каменного угля (Зырянский бассейн), строительного сырья и т.д. Представленные новые модели раздела Мохо и упругих параметров литосферы также позволяют уточнение данных о геолого-тектоническом строении территории и её развитии, в том числе о формировании месторождений полезных ископаемых в отдельных геологических структурах. Информативной с точки зрения оценки нефтегазоносности АЗРФ и изучения термального поля специфических геоморфологических структур, связанных с зонами дегазации мантии, является карта теплового потока, составленная не только для АЗРФ, но и для всей циркумполярной Арктики. Также эта карта полезна для оценки динамики водных ресурсов ледовых покровов.

Полученные результаты оценки состояния литосферы (как региона в целом, так и отдельных структур) являются важной геолого-геофизической информацией, которую необходимо учитывать при проектировании и развитии транспортной инфраструктуры в АЗРФ. Карты гравитационного поля, мощности осадочного чехла и строения осадочных бассейнов, упругих параметров литосферы предоставляют комплексную информацию о её геологическом строении, геодинамических условиях и о зонах напряжения. Эти данные необхо-



димы для всесторонней оценки пригодности геологической среды для проектирования железных дорог, автодорог, аэродромов и морских портов, а также трубопроводов и линий связи и электропередачи в АЗРФ. Карта теплового потока информативна с точки зрения оценки инженерно-геологических и экологических рисков при строительстве и прокладке магистралей в зонах распространения многолетнемёрзлых пород, а также для прогнозирования возможных изменений уровня моря вследствие таяния ледников, что важно при проектировании морских портов. Полученные результаты как в комплексе, так и по отдельности обладают высокой практической значимостью для освоения региона АЗРФ и его развития.

Представленные результаты по оценке сейсмической опасности в российской Арктике имеют стратегическое значение. Построенные для восточного сектора АЗРФ FCAZ-зоны определяют пространственные области, в пределах которых возможно в прошлом, настоящем или будущем возникновение эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$ баллов. В выявленных зонах, отмеченных красно-зелёным цветом (FCAZ-зоны) на рис. 20, особое внимание должно быть уделено безопасному функционированию существующих и планированию новых транспортных путей и объектов. К ним относятся строящийся сегодня Северный широтный ход в Ямало-Ненецком автономном округе. Повышенное внимание в оконтуренных зонах должно быть уделено сейсмостойкости строительства новых автомобильных магистралей, морских и речных портов, аэропортов, железнодорожных инфраструктур и т.д. В распознанных высокосейсмичных зонах следует создать специальные мониторинговые комплексы, которые будут гарантировать эффективную связь указанных базовых объектов транспортных инфраструктур с центрами принятия решения Минтранса, РЖД, Аэрофлота и МЧС.

С точки зрения сейсмологического аспекта выполненных исследований следует отметить беспрецедентную важность создания объединённого унифицированного по магнитуде каталога землетрясений АЗРФ, реализованного в виде трех независимых информационных продуктов: объединённого каталога восточной части АЗРФ, объединён-

ного каталога западной части АЗРФ и объединённого каталога зоны хребта Гаккеля. Созданный оригинальный метод интегрирования воедино каталогов землетрясений различных агентств можно рассматривать как существенное продвижение в части сейсмологии, посвящённой каталогизации сейсмических событий. Созданный метод системного анализа является весомым вкладом в развитие геоинформатики.

За предшествующие десятилетия усилиями производственных организаций, научно-исследовательских институтов и государственных агентств в России и за рубежом были накоплены значительные массивы пространственной геолого-геофизической информации по арктическому региону. В последние годы данный процесс существенно интенсифицировался с расширением наблюдательной сети и запуском специализированных космических аппаратов, например ИСЗ «Арктика-М» [82]. Современные геоинформационные системы позволяют осуществлять эффективный сбор, хранение и интеллектуальный анализ пространственных данных по различным дисциплинам в области наук о Земле (напр., [83; 84]).

С целью системного анализа воздействия геофизических процессов на состояние и устойчивое развитие транспортной инфраструктуры в Арктике ведётся разработка геоинформационных методов и технологий сбора, анализа, прогноза и представления геолого-геофизических и климатических данных в данном регионе. Для создания такой ГИС был выбран клиент-серверный подход, реализованный в виде тематического геопортала для взаимодействия пользователя с пространственной информацией, серверной части, осуществляющей функционирование всей системы, и базы геоданных, обеспечивающей хранение пространственной информации. В этой модели база геоданных объединяет информацию по различным дисциплинам в области геологии, геофизики и климатологии.

В ходе исследований электромагнитных процессов околоземной среды и воздействий космической погоды на технологические системы в базу данных ГИС были включены данные глобальной высокоточной модели литосферного магнитного поля Земли. Данные о литосферном магнитном поле находят применение при решении задач навигации

по физическим полям Земли. В рамках исследования крупных геологических структур и осадочных бассейнов на основе комплексного анализа гравитационного поля и других геолого-геофизических характеристик были собраны данные по детальному строению и свойствам литосферы Земли в регионе российской Арктики. Собранные в ГИС данные отражают сложные динамические процессы, происходящие в земной коре, которые необходимо учитывать при развитии инженерной инфраструктуры в данном регионе. В ходе исследований по оценке сейсмической и иных геодинамических опасностей в районах перспективного развития транспортной инфраструктуры АЗРФ в ГИС был включён наиболее полный унифицированный каталог землетрясений, необходимый для пространственной оценки сейсмической активности.

При создании ГИС по АЗРФ отдельное внимание уделяется исследованию климатических процессов, критичных для развития транспортной инфраструктуры в регионе. На основе данных многолетних измерений основных климатических параметров (температура воздуха у поверхности, температура почвы, общее количество осадков, скорость ветра у поверхности земли, влагосодержание почвы, влажность воздуха, толщина снежного покрова, изменение уровня внутренних вод и др.) в среде ГИС были построены соответствующие тематические карты и схемы. Совместный анализ широкого набора климатических данных в среде ГИС позволяет оценить воздействие текущих климатических изменений на объекты транспортной инфраструктуры (например, растепление многолетнемерзлых пород, увеличение зон затопления во время паводка). Таким образом, сформированная база пространственных данных, а также широкий набор ГИС-инструментов их анализа являются важным инструментом оценки негативных факторов воздействия различных геофизических процессов на развитие транспортной инфраструктуры в российской Арктике.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdk, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdk, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway

Development. Applied Sciences, 2023, Vol. 13, Iss. 9, 5278. DOI: 10.3390/app13095278.

2. Johansson, J., Hassel, H., Cedergren, A. Vulnerability analysis of interdependent critical infrastructures: case study of the Swedish railway system. International Journal of Critical Infrastructure, 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 289–316. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2011.045065> [ограниченный доступ].

3. Garmabaki, A. H. S., Marklund, S., Thaduri, A., Hedström, A., Kumar, U. Underground pipelines and railway infrastructure – failure consequences and restrictions. Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2020, Vol. 16, Iss. 3, pp. 412–430. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1666885>.

4. Oughton, E. J., Skelton, A., Horne, R. B., Thomson, A. W. P., Gaunt, C. T. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. Space Weather, 2017, Vol. 15, Iss. 1, pp. 65–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001491>.

5. Forte, B., Vani, B. C., Smith, N., Astin, I., Monico, J. F. G., Ruffenach, A., Flintoft, I., Concannon, A., McCormack, L., Koulouri, A. Space weather disruptions to satellite navigation and telecommunications in the case of interdependent services. 2018, poster session presented at 15th European Space Weather Week, Leuven, Belgium.

6. Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю., Соловьёв А. А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. – М.: РАН, 2019. – 186 с. ISBN: 978-5-907036-43-7.

7. Gvishiani A., Soloviev A. Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation. Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58969-1 [ограниченный доступ].

8. Pirjola, R., Kauristie, K., Lappalainen, H., Viljanen, A., Pulkkinen, A. Space weather risk. Space Weather, 2005, Vol. 3, Iss. 2. S02A02, DOI:10.1029/2004SW000112.

9. Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 73–110. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>.

10. Касинский В. В., Птицына Н. Г., Ляхов Н. Н., Тясто М. И., Виллорези Дж., Ючи Н. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47. – № 5. – С. 714–718. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9534019>. EDN: IAQLUJ. Доступ 03.04.2023.

11. Eroshenko, E. A., Belov, A. V., Boteler, D., Gaidash, S. P., Lobkov, S. L., Pirjola, R., Trichtchenko, L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. Advances in Space Research, 2010, Vol. 46, Iss. 9, pp. 1102–1110. DOI: 10.1016/j.asr.2010.05.017.

12. Love, J. J., Hayakawa, H., & Cliver, E. W. Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921. Space Weather, 2019, Vol. 17, Iss. 8, pp. 1281–1292. DOI: 10.1029/2019SW002250.

13. Silverman, S. M., Cliver, E. W. Low-latitude auroras: the magnetic storm of 14–15 May 1921. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, Vol. 63, Iss. 5, pp. 523–535 DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00174-7) [ограниченный доступ].

14. Hapgood, M. The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event. Space Weather, Vol. 17, Iss. 7, pp. 950–975. DOI: 10.1029/2019SW002195

15. Wik, M., Pirjola, R., Lundstedt, H., Viljanen, A., Wintoft, P., Pulkkinen, A. Space weather events in July 1982



and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. *Annales Geophysicae*, 2009, Vol. 27, Iss. 4, pp. 1775–1787. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009>.

16. Пилипенко В. А., Черников А. А., Соловьев А. А., Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Кудин Д. В., Костарев Д. В., Козырева О. В., Воробьев А. В., Белов А. В. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – Т. 23. – № 2. – С. 1–34. ES2008. DOI: 10.2205/2023ES000824.

17. Ptitsyna, N. G., Tyasto, M. I., Kassinskii, V. V., Lyakhov, N. N., Villaresi, G. Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? Proc. of 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St. Petersburg, 26–29 June 2007, pp. 288–290. ISBN 9781424412693, IEEE # CFP07626-POD [ограниченный доступ].

18. Ptitsyna, N. G., Kasinsky, V. V., Villaresi, G., Lyahov, N. N., Dorman, L. I., Iucci, N. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway. *Advances in Space Research*, 2008, Vol. 42, Iss. 9, pp. 1510–1514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015> [ограниченный доступ].

19. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврального электрождета и геоиндуцированных токов // *Солнечно-земная физика*. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 48–58. DOI: 10.12737/szf-51201905.

20. Vorobev, A., Soloviev, A., Pilipenko, V., Vorobeve, G., Sakharov, Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 3, 1522. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031522>.

21. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации $pc5/pi3$ и геоиндуцированные токи // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 445–450. DOI: <http://dx.doi.org/10.31857/s0367676521030236>.

22. Ягова Н. В., Розенберг И. Н., Гвишиани А. Д., Сахаров Я. А., Гаранин С. Л., Воронин В. А., Пилипенко В. А., Дубчак И. А. Исследование влияния геомагнитной активности на функционирование систем железнодорожной автоматики в Арктической зоне России // *Арктика: экология и экономика*. – 2023. – Т. 13. – № 3 [в печати].

23. Чинкин В. Е., Соловьев А. А., Пилипенко В. А. Выделение вихревых токовых структур в ионосфере и оценка их параметров по наземным магнитным данным // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2020. – Т. 60. – № 5. – С. 588–599. DOI: 10.31857/S001679402005003X.

24. Chinkin, V. E., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Engebretson, M. J., Sakharov, Ya. A. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, Vol. 212, 105514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514> [ограниченный доступ; текст рукописи доступен].

25. Newell, P. T., Liou, K., Zhang, Y., Sotiirelis, T., Paxton, L. J., Mitchell, E. J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*, 2014, Vol. 12, Iss. 6, pp. 368–379. DOI: 10.1002/2014SW001056.

26. Воробьев А. В., Соловьев А. А., Пилипенко В. А., Воробьева Г. Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // *Солнечно-земная*

физика. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 93–100. DOI: 10.12737/szf-82202213.

27. Vorobev, A. V., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Vorobeve, G. R. Internet Application for Interactive Visualization of Geophysical and Space Data: Approach, Architecture, Technologies. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2023, Vol. 48, No. 4, pp. 151–160. DOI: 10.22059/jesphys.2023.350281.1007467.

28. Thaduri, A., Galar, D., Kumar, U. Railway assets: a potential domain for big data analytics. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 53, pp. 457–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.323>.

29. Kans, M., Galar, D., Thaduri, A. Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. In: Koskinen, K., [et al]. *Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_30 [ограниченный доступ].

30. Jo, O., Kim, Y.-K., Kim, J. Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, Vol. 5, No. 2, pp. 482–490. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2749401.

31. Thaduri, A., Verma, A. K., Kumar, U. Maintenance of Railway Infrastructure Using Cyber-Physical Systems. In: Kapur, P. K., Singh, G., Klockhov, Y. S., Kumar, U. (eds). *Decision Analytics Applications in Industry. Asset Analytics*. Springer, Singapore, 2020, pp. 521–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3643-4_41 [ограниченный доступ].

32. Pirjola, R. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Advances in Space Research*, 2005, Vol. 36, Iss. 12, pp. 2231–2240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.04.074> [ограниченный доступ].

33. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т солнечно-земной физики. – Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики СО РАН: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 479 с. ISBN 5-98277-033-7.

34. Sato, H., Jakowski, N., Berdermann, J., Jiricka, K., Heßelbarth, A., Banyš, D., Wilken, V. Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies. *Space Weather*, 2019, Vol. 17, Iss. 6, pp. 816–826. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002198>.

35. Cerruti, A. P., Kintner, P. M., Gary, D. E., Lanzerotti, L. J., de Paula, E. R., Vo, H. B. Observed solar radio burst effects on GPS/Wide Area Augmentation System carrier-to-noise ratio. *Space Weather*, 2006, Vol. 6, Iss. 4, S10006. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006SW000254>.

36. Yasyukevich, Y. V., Yasyukevich, A. S., Astafyeva, E. I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts. *GPS Solutions*, 2021, Vol. 25, Iss. 2, art. 46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5> [ограниченный доступ].

37. Bisnath, S., Gao, Y. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future. *GPS World*, April 2009, Iss. 4, pp. 43–50. [Электронный ресурс]: <https://gge.ext.unb.ca/Resources/gpsworld.april09.pdf>. Доступ 03.04.2023.

38. Boteler, D. H., Pirjola, R. J., Nevanlinna, H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 22, Iss. 1, pp. 17–27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X) [ограниченный доступ].

39. Pirjola, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*,

2000, Vol. 28, Iss. 6, pp. 1867–1873. DOI: 10.1109/27.902215 [ограниченный доступ].

40. Успенский М. И. Смягчение воздействия геомагнитных штормов на электроэнергетическую систему // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – № 4 (32). – С. 116–122. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32269413&ysclid=1ktqioxq3h876970014>. Доступ 03.04.2023.

41. Gaunt, C. T. Why space weather is relevant to electrical power systems. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 1, pp. 2–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001306>.

42. Krausmann, E., Andersson, E., Russell, T., Murtagh, W. Space Weather and Rail: Findings and Outlook (European Commission, JRC Science and Policy Reports), 2015. DOI: 10.2788/211456.

43. Apatenkov, S. V., Pilipenko, V. A., Gordeev, E. I., Viljanen, A., Juusola, L., Belakhovsky, V. B., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, Iss. 6, e2019GL086677. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL086677>.

44. Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>.

45. Sakharov, Ya. A., Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Selivanov, V. N. Spectral content of pc5–6/pi3 geomagnetic pulsations and their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2022, Vol. 22, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.2205/2021es000785>.

46. Matandirotya, E., Cilliers, P. J., Van Zyl, R. R., Oyedokun, D. T., de Villiers, J. Differential magnetometer method applied to measurement of geomagnetically induced currents in Southern African power networks. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 3, pp. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001289>.

47. Hübert, J., Beggan, C. D., Richardson, G. S., Martyn, T., Thomson, A. W. P. Differential magnetometer measurements of geomagnetically induced currents in a complex high voltage network. *Space Weather*, 2020, Vol. 18, Iss. 4, e2019SW002421. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002421>.

48. Torta, J. M., Marsal, S., Ledo, J., Queralt, P., Canillas-Pérez, V., Piña-Varas, P., Curto, J. J., Marcuello, A., Martí, A. New detailed modeling of GICs in the Spanish power transmission grid. *Space Weather*, 2012, Vol. 19, Iss. 9, e2012SW002805. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012SW002805>.

49. Watari, S., Nakamura, S., Ebihara, Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, 102. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3>.

50. Alves Ribeiro, J., Pinheiro, F. J. G., Pais, M. A., Santos, R., Cardoso, J., Baltazar-Soares, P., Monteiro Santos, F. A. Toward More Accurate GIC Estimations in the Portuguese Power Network. *Space Weather*, 2023, Vol. 21, Iss. 6, e2022SW003397. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003397>.

51. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – Издание 7-е, исправленное. – М.: Наука, 1988. – 512 с. («Теоретическая физика», том II). ISBN 5-02-014420-7.

52. Soloviev, A., Dobrovolsky, M., Kudin, D., Sidorov, R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory

Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 2015. DOI: 10.2205/kli2011min.

53. Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Красноперов Р. И., Груднев А. А., Хохлов А. В. Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56. – № 3. – С. 365–379. DOI: 10.7868/S0016794016030160.

54. Kaban, M. K., Sidorov, R. V., Soloviev, A. A., Gvishiani, A. D., Petrunin, A. G., Petrov, O. V., Kashubin, S. N., Androsov, E. A., Milshtein, E. D. A New Moho Map for North-Eastern Eurasia Based on the Analysis of Various Geophysical Data. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, Vol. 179, Iss. 11, pp. 3903–3916. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02925-6>.

55. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I. M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R. E., Sergeev, S., Smelror, M. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth-Science Reviews*, 2016, Vol. 154, March, pp. 29–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>.

56. Sidorov, R. V., Kaban, M. K., Soloviev, A. A., Petrunin, A. G., Gvishiani, A. D., Oshchenko, A. A., Popov, A. B., Krasnoperov, R. I. Sedimentary basins of the eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompensative gravity anomalies. *Solid Earth*, 2021, Vol. 12, Iss. 12, pp. 2773–2788. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-12-2773-2021>.

57. Petrunin, A. G., Soloviev, A. A., Sidorov, R. V., Gvishiani, A. D. Inverse-forward method for heat flow estimation: case study for the Arctic region. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, Vol. 22, № 6, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022ES000809>.

58. Davies, J. H. Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, Vol. 14, Iss. 10, pp. 4608–4622. DOI: <https://doi.org/10.1002/ggge.20271>.

59. Lucazeau, F. Analysis and mapping of an updated terrestrial heat flow data set. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, Vol. 20, Iss. 8, pp. 4001–4024. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GC008389>.

60. Kaban, M. K., Chen, B., Tesauro, M., Petrunin, A. G., El Khrepy, S., Al-Arifi, N. Reconsidering Effective Elastic Thickness Estimates by Incorporating the Effect of Sediments: A Case Study for Europe. *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, Iss. 18, pp. 9523–9532. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL079732>.

61. Soloviev, A., Petrunin, A., Gvozdk, S., Sidorov, R. A Set of Geophysical Fields for Modeling of the Lithosphere Structure and Dynamics in the Russian Arctic Zone. *Data*, 2023, Vol. 8, Iss. 5, 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/data8050091>.

62. Шебакин П. Н., Гвишиани А. Д., Дзедобоев Б. А., Скоркина А. А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 507. – № 1. – С. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.

63. Ulomov, V. I., The GSHAP Region 7 Working Group. Seismic hazard of Northern Eurasia. *Annali di Geofisica*, 1999, Vol. 42, No. 6, pp. 1023–1038. DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-3785>.

64. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. Earthquake clusters in southern California. I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, Iss. 6, pp. 2847–2864. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>.

65. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophysical Journal*



International, 2016, Vol. 207, Iss. 1, pp. 608–634. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw300>.

66. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V., Antipova, A. O. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs. *Frontiers in Earth Science*, 2022, Vol. 10, 820277. DOI: 10.3389/feart.2022.820277.

67. Gvishiani, A. D., Vorobieva, I. A., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 10, 5010. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12105010>.

68. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A., Sergeeva, N. A., Fomenko, N. A. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 12, 7084. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127084>.

69. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Kedrov, E. O., Skorkina, A. A., Nikitina, I. M. Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 23, 11990. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311990>.

70. Shebalin, P. N., Narteau, C., Baranov, S. V. Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*, 2020, Vol. 222, Iss. 2, pp. 1264–1269. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252>.

71. Гвишиани А. Д., Дзебоев Б. А., Агаян С. М. Интеллектуальная система распознавания FCaZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // *Физика Земли*. – 2016. – № 4. – С. 3–23. DOI: 10.7868/S0002333716040013.

72. Ogata, Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 1989, Vol. 169, Iss. 1–3, pp. 159–174. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90191-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90191-1).

73. Zhuang, J., Ogata, Y., Vere-Jones, D. Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, Vol. 109, Iss. B5, B05301. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JB002879>.

74. Baranov, S. V., Gvishiani, A. D., Narteau, C., Shebalin, P. N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2019, Vol. 19, Iss. 6, ES6003. DOI: 10.2205/2019ES000695.

75. Dzeboev, B. A., Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Belov, I. O., Karapetyan, J. K., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, Iss. 17, 7972. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177972>.

76. Thébaud, E., Hulot, G., Langlais, B., Vigneron, P. A Spherical Harmonic Model of Earth's Lithospheric Magnetic Field up to Degree 1050. *Geophysical Research*

Letters, 2021, Vol. 48, Iss. 21, e2021GL095147. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL095147>.

77. Соловьев А. А., Сидоров Р. В., Ощенко А. А., Зайцев А. Н. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике // *Физика Земли*. – 2022. – № 3. – С. 136–152. DOI: 10.31857/S0002333722020120.

78. Воробьева А. В., Соловьев А. А., Пилипенко В. А., Воробьева Г. Р., Гайнетдинова А. А., Лапин А. Н., Белуховский В. Б., Ролдугин А. В. Локальная диагностика наличия полярных сияний на основе интеллектуального анализа геомагнитных данных // *Солнечно-земная физика*. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-92202303>.

79. Розенберг И. Н., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Воронин В. А., Пилипенко В. А. Влияние космической погоды на надёжность функционирования железнодорожного транспорта в Арктической зоне России // *Железнодорожный транспорт*. – 2021. – № 12. – С. 20–26. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zhbcw&ysclid=lktpuha4xl415913232> [ограниченный доступ].

80. Петрукович А. А., Бреус Т. К., Деминов М. Г., Дмитриев А. В., Кривошукский А. А., Петров В. М., Пулинец С. А., Распопов О. М., Наговицын Ю. А., Трищенко Л. Д., Трошичев О. А. Эффекты космической погоды. Геомагнитные возмущения и системы электроснабжения и проводной связи. В книге: *Плазменная гелиогеофизика. Монография: в 2 т. [М. А. Лившиц и др.]; под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. – Т. 2. – 559 с. – С. 213–219. ISBN 978-5-9221-1041-9.*

81. Liu, L., Ge, X., Zong, W., Zhou, Y., Liu, M. Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 10, pp. 754–763. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001411>.

82. Асмус В. В., Милехин О. Е., Крамарева Л. С., Хайлов М. Н., Ширшаков А. Е., Шумаков И. А. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // *Метеорология и гидрология*. – 2021. – № 12. – С. 11–26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.

83. Soloviev, A., Khokhlov, A., Jalkovsky, E., Berezko, A., Lebedev, A., Kharin, E., Shestopalov, I., Manda, M., Kuznetsov, V., Bondar, T., Mabie, J., Nisilevich, M., Nechitailenko, V., Rybkina, A., Pyatygina, O., Shibaeva, A. The Atlas of the Earth's Magnetic Field. (Eds.: Gvishiani, A., Frolov, A., Lapshin, V.). Publ. GC RAS, Moscow, 2013, 361 p. ISBN 978-5-904509-13-2. DOI: 10.2205/2013BS011_Atlas_MPZ.

84. Соловьев А. А., Соловьев А. А., Гвишиани А. Д., Николов Б. П., Николова Ю. И. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // *Исследование Земли из космоса*. – 2018. – № 5. – С. 52–64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.

Информация об авторах:

Гвишиани Алексей Джерменович – доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, председатель Ученого совета Геофизического центра Российской академии наук, Москва, Россия.

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, проректор Российского университета транспорта; Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, i.rozenberg@geosc.ru.

Соловьев Анатолий Александрович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор Российской академии наук, директор Геофизического центра Российской академии наук, Москва, Россия.

Статья поступила в редакцию 04.11.2022, одобрена после рецензирования 17.02.2023, актуализирована 26.06.2023, принята к публикации 28.06.2023.



АВТОНОМНЫЕ СУДА 36

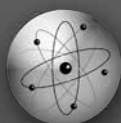
Оценка базовых алгоритмов управления и определение направлений дальнейшего научного поиска.

БЕРЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ 42

Надёжность набросных бун и железные дороги.



НАУКА И ТЕХНИКА

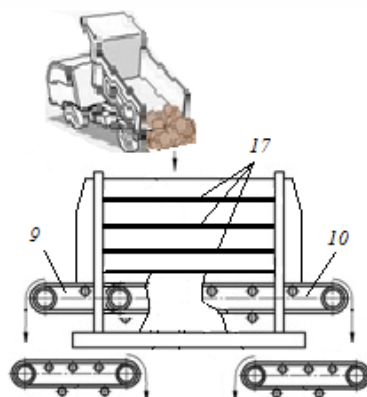


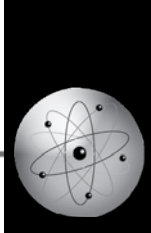
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ 50

Анизотропные свойства верхнего строения пути на подходах к мостам: моделирование и выводы.

АВТОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО 59

Проект энергонезависимого оборудования для заготовки щебня.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 004.89:656.6:629.072

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>

Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей



Максим КУДРОВ



Кирилл БУХАРОВ



Даниил МАХОТКИН



Рафаэль АЙВАЗОВ

Максим Александрович Кудров¹, Кирилл Дмитриевич Бухаров²,
Даниил Русланович Махоткин³, Рафаэль Сергеевич Айвазов⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

✉ ¹ kudrov.ma@mipt.ru.

АННОТАЦИЯ

Одной из наиболее бурно развивающихся транспортных технологий в настоящее время является создание автономных (безэкипажных) надводных судов для коммерческого, технического и вспомогательного флота. Ключевым вопросом её внедрения является создание комплексной системы управления (КСУ) безопасным движением БЭС в автоматическом режиме по маршруту. При этом нужно иметь в виду

специфику морской навигации и плавания по внутренним водным путям.

Проведён аналитический обзор базовых алгоритмов управления по курсу и скорости. Сформулированы основные проблемы создания комплексной системы управления безэкипажным судном. Приведена постановка задачи управления и определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: водный транспорт, автоматизированная система управления, безэкипажное судовождение, навигация.

Для цитирования: Кудров М. А., Бухаров К. Д., Махоткин Д. Р., Айвазов Р. С. Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создание безэкипажных судов (БЭС) для коммерческих морских перевозок, технического и вспомогательного флота находится в фокусе внимания ведущих морских держав, поскольку позволит повысить безопасность и эффективность судовождения. Одним из ключевых вопросов, которые необходимо решить для создания безэкипажного судна, является создание комплексной системы управления (КСУ) безопасным движением БЭС в автоматическом режиме по маршруту.

Системы адаптивного управления движением (САУД) являются передовым классом автоматизированных систем управления судном. Как отмечают Г. Э. Острцов и Л. М. Клячко, авторы ряда работ (в том числе, [1; 2]) к которым мы будем неоднократно обращаться, САУД способны оценивать параметры движения и изменять коэффициенты регулирования в зависимости от условий эксплуатации. Однако даже современные САУД используются в основном в открытом море, где нет ограничений по маневрированию и отклонению от курса. Задача автоматического управления судном в речных акваториях и при расхождении с другими судами в условиях волнения, течения и ветра до сих пор полностью не решена.

Целью исследования является формулировка базовых задач, связанных с повышением степени автоматизации управления для создания безэкипажных судов, в том числе эксплуатируемых на внутренних водных путях, и определение дальнейших направлений исследований в этой области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аналитический обзор алгоритмов управления

Автоматическая проводка судна из одной точки в другую является сложной задачей управления, которая ставилась и ранее (напр.: [3]), но приобрела сейчас по мере развития автономного судовождения особую актуальность (напр.: [4–7]).

Достаточно широко известен подход к упрощению данной задачи путём её разделения на две основные задачи, которые можно рассматривать как самостоятельные:

- управление траекторией и курсом судна, не учитывая изменение скорости хода;
- управление скоростью хода, которое достигается изменением режима работы главной двигательной установки.

При таком разделении можно снизить порядок рассматриваемой системы уравнений движения и упростить процедуру синтеза алгоритмов.

Алгоритмы управления по курсу

Первые авторулевые системы работали на основе пропорциональных (П) законов управления, формулы которых представлены, например, в упомянутой выше работе [1]. При этом, как это отмечается в ней, линейный П-закон управления не обеспечивал устойчивость замкнутой системы автоматического управления движением по курсу на среднетоннажных судах, и судно не могло удерживать заданный курс без колебаний с амплитудой до двух градусов. Использование таких авторулевых систем на крупнотоннажных судах было невозможно [1].

В связи с этим были разработаны авторулевые системы с пропорционально-дифференциальным (ПД) законом управления. Эти системы показали себя более эффективными в условиях волнения и были оснащены датчиками угловых скоростей, а также надёжными аналоговыми элементами. В законе управления по-прежнему использовался коэффициент усиления k , но также добавлялся дифференциальный член, который позволял более точно управлять курсом судна. Формула для такого закона управления выглядит следующим образом [2]:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_1 \cdot \Delta\varphi + k_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

Авторулевые разработки имели конечной целью стабилизацию курса судна. Для этого был разработан авторулевой, который использует пропорционально-интегрально-дифференциальные законы управления (ПИД), формулировка которых также содержится в [1].

При ручном управлении рулевым приводом количество переключений составляет не более 100 в час, но при беспокойном море оно может достигать 1400 в час, что крайне нежелательно.



Для уменьшения перегрузки и срезания высокочастотных составляющих морского волнения был разработан пропорционально-дифференциально-фильтрованный (ПДФ) закон управления, который срезает высокочастотные составляющие морского волнения [1; 2].

Затем была создана адаптивная система управления движением (САУД) с блоком оценивания измеряемых параметров и «блоком подстройки коэффициентов регулирования при изменении условий эксплуатации. Такие самонастраивающиеся САУД с автономной адаптивной перестройкой параметров или с использованием информации об условиях плавания для перестройки закона управления, а также с блоком прогноза фазового состояния судна и подсистемой диагноза начали выпускаться во всем мире» [1; 2].

Авторы [2] со ссылкой на зарубежные источники результатов мореходных испытаний указывают, что «подстройка коэффициента передачи k_1 снижает расход топлива на 2 %, а использование оценок при формировании законов управления сокращает время рейса на 2 %» [2].

Управление движением по маршруту

В общем случае маршрут перемещения судна состоит из последовательности прямых и кривых отрезков. Требование к прохождению каждого отрезка обычно устанавливается величиной допустимого бокового отклонения от него. Может потребоваться корректировка выбранного маршрута, например, для расхождения с другими судами или из-за неблагоприятных условий в районе движения.

Автоматическое управление движением судна особенно широко применяется на открытой воде, где не требуется активное маневрирование. Однако и при автоматическом управлении существует необходимость гарантировать попадание судна в заданные точки маршрута, особенно при наличии внешних возмущений, таких как ветер и волны, что существующие системы автоматического управления не гарантируют даже при использовании ПИД закона управления (см., напр. [1]).

С появлением спутниковых навигацион-

ных систем появилась возможность определить координаты судна в любой момент времени, а, следовательно, автоматизировать движение судна по маршруту, состоящему из набора точек с известными координатами.

Технологии использования САУД с приёмником спутниковой навигации подробно рассматриваются в целом ряде источников [1; 2; 8].

С учётом рассматриваемых задач и опыта использования САУД, можно сделать вывод, что система управления должна автоматически подстраивать коэффициенты при хождении на малых скоростях и глубинах, изменении загрузки, а также при сильном волнении.

Варианты алгоритмов траекторного управления

Траекторное управление нашло широкое применение в различных областях, в том числе в робототехнике [9; 10], авиации, в том числе беспилотной [11], анализировался данный вопрос применительно к морскому транспорту и в ряде других, помимо вышеуказанных, работ [12].

Алгоритмы навигации – это выполнение двуединой задачи определения собственного положения в пространстве, т. е. определение в каждый текущий момент времени пространственного углового положения (алгоритмы ориентации) и определение в каждый текущий момент времени проекций скорости и координат (счисление скорости и координат) на оси инерциальной системы координат.

Алгоритмы управления служат для расчёта таких команд управления для прихода в точку интереса, то есть для выработки траекторий, при которых относительные координаты транспортного средства и конечной точки его движения одновременно обращались бы в ноль в некоторый терминальный (заключительный) момент времени.

Алгоритмы стабилизации служат для того, чтобы преобразовать управляющие команды, рассчитываемые в наведении, в сигналы, вызывающие повороты рулей, или изменения положения других органов управления, то есть иными словами, чтобы рули

в каждый момент времени отклонялись так, чтобы в конечный момент времени транспортное средство достигло конечной точки (напр.: [13–15]).

Метод наведения по поперечным ускорениям

Траекторией движения называется такая непрерывная кривая, в каждой точке которой вектор скорости транспортного средства направлен по касательной к ней.

Чтобы изменить траекторию, то есть изменить направление движения транспортного средства, нужно повернуть вектор скорости. Поворачивать вектор скорости можно разными способами.

Например, можно создать приращение вектора скорости в поперечном направлении, то есть, иными словами, создать ортогональное к вектору скорости ускорение.

Применяются также (в основном для летательных аппаратов) методы наведения по мгновенному промаху и пропорционального наведения.

Существенную сложность при реализации ПИД-регулятора угла курса представляет наличие зашумлённости измеряемого сигнала угла курса вследствие волнения морской поверхности. Кроме того, в регуляторе угла курса необходимо знать так же и скорость рыскания; если её величину получать простым дифференцированием сигнала угла курса, то зашумлённость сигнала будет расти.

В случае применения метода управления по мгновенному промаху к судам вектор полного ускорения будет иметь одну нулевую компоненту. Управление судном по поперечному ускорению труднореализуемо на практике в силу особенностей органов управления, но возможно осуществить пересчёт ускорения в соответствующую угловую скорость рыскания и управлять через этот параметр.

Алгоритмы управления в канале скорости

Вопросы построения алгоритмов управления скоростью судна в отечественной литературе не рассмотрены достаточно подробно. Традиционно, алгоритм управления обобщённым параметром – эквивалентом тяги строится на основе ПИД или ПИ-регулятора по скорости. Канал скорости, по всей

видимости, не представляет трудности для регулирования.

Ввиду этого, целесообразно использование алгоритмов управления эквивалентом тяги.

Пусть известна текущая скорость судна V и заданная скорость V_3 . Тогда можно получить заданное изменение скорости $\dot{V}_3 = R(p)(V_3 - V)$, где $R(p)$ – некоторый оператор управления, $\dot{V}_{3min} \leq \dot{V}_3 \leq \dot{V}_{3max}$.

Затем формируется сигнал управления эквивалентом тяги:

$$\mathcal{Q}_{m3} = K_1 \dot{V}_3 + \frac{K_2}{p} (\dot{V}_3 - \dot{V}),$$

$$\mathcal{Q}_m^{min} \leq \mathcal{Q}_{m3} \leq \mathcal{Q}_m^{max},$$

где \mathcal{Q}_m^{min} и \mathcal{Q}_m^{max} соответствуют режимам «малый ход» и «полный ход». Эквивалент тяги используется для того, чтобы получить линейную систему. Далее его нужно пересчитать в реальную тягу. Коэффициенты K_1 и K_2 могут быть функциями скорости хода или иных параметров.

Возможны несколько способов для повышения устойчивости:

- введение в алгоритмы управления «тяжёлого» фильтра на управляющее воздействие, приходящее на привод;
- использование попеременного включения-отключения привода, по аналогии с ШИМ-управлением (широтно-импульсная модуляция).

Оба способа снизят быстродействие системы и перед внедрением необходимо оценить эффективность их применения.

Приведённый базовый алгоритм управления скоростью судна может использоваться в качестве первого приближения при синтезе алгоритмов управления в канале скорости.

Постановка задачи траекторного управления

Алгоритм должен обеспечивать выработку команд управления исполнительным механизмом для следования по маршруту, задаваемому последовательностью промежуточных пунктов маршрута (ППМ). Последовательность ППМ формируется на основе маршрутного задания с учетом правил навигации и окружающей обстановки. Алгоритм





Рис. 1. Принципиальная схема работы алгоритма управления [составлена авторами].

должен обеспечивать минимизацию отклонения судна от отрезков, соединяющих ППМ.

Задачи заключаются в следующем:

- управление рулями, двигателями и подруливающим устройством;
- управление безразмерной скоростью рыскания $\bar{\omega} = \frac{\omega L}{V} = R^{-1}$;

- стабилизация заданной линии пути (ЗЛП);
- переключение между ЗЛП с боковым упреждением разворота (БУР).

В каждый такт работы алгоритм получает на вход следующие параметры:

- векторы координат трёх поворотных пунктов маршрута (ППМ) x_1 , x_2 и x_3 , образующих две заданные линии пути (x_1 , x_2) и (x_2 , x_3) (от модуля планирования маршрута);
- вектор координат судна x [м]; скорость рыскания ω_y [град/с]; вектор путевой скорости V_k [м/с] (от системы навигации).

Выходными параметрами являются:

- заданное положение руля направления δ_s [град] (на привод руля);
- сигналы заданных оборотов подруливающего винта n [об/с] (на блок управления подруливающим устройством, в режиме швартовки);
- сигналы заданных оборотов двигателей n [об/с] (на электронный блок управления двигателем).

Принципиальная схема работы алгоритма следования по маршруту представлена на рис. 1. В алгоритм от модуля планирования маршрута поступают тройки промежуточных

точек маршрута и флаг `ext_reset`, который сигнализирует алгоритму следования по маршруту о получении новой тройки ППМ. В свою очередь, алгоритм следования по маршруту передаёт в модуль планирования маршрута флаг подтверждения `PL_flag` при переходе на вторую линию пути.

Направления дальнейших исследований

К их числу относятся:

- разработка адаптивной математической модели динамики движения судна для подстройки системы управления под различные суда и под различную загрузку судна;
- реализация режимов управления на малом ходу для швартовки с использованием подруливающих устройств, а также для удержания точки и маневрирования в порту;
- совместное управление по курсу и скорости для повышения точности решения задачи управления;
- оценка скорости и направления движения, например, по доплеровскому лагу относительно дна для компенсации шумов по курсу и скорости;
- оценка скорости и направления ветра и течения по погодным датчикам для предупреждающей компенсации возмущений;
- применение внешних контроллеров качества управления для обнаружения отказов, оптимизации ресурса приводов управления и повышения устойчивости решения;
- совместная оптимизация характеристик приводов управления по ресурсу и системы управления по точности выдерживания маршрута (число переключений привода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён аналитический обзор алгоритмов и систем управления судном по курсу и скорости, выделены ключевые ограничения существующих решений.

На основании аналитического обзора сформулирована постановка задачи траекторного управления автономным судном.

Определены направления дальнейших исследований (создание адаптивной системы для работы на различных судах, работа на малом ходу, совместное управление по курсу и скорости, использование априорной информации от датчиков, устойчивость системы, фильтрация и коррекция сигналов, обнаружение отказов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Острецов Г. Э., Клячко Л. М. Методы автоматизации управления движением корабля. – М.: Физматлит, 2009. – 120 с. ISBN 978-5-9221-1138-6.
2. Острецов Г. Э., Клячко Л. М. Основные этапы автоматизации управления движением морского судна // Судостроение. – 2005. – № 4 (671). – С. 55–59. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=hvejud>. EDN: HVEJUD. Доступ 17.05.2023.
3. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/vaguschenko-ll-cymbal-nn-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-dvizheniem-sudna_7e4e87f6b13.html. Доступ 17.05.2023.
4. Попов А. Н., Бурылин Я. В., Кондратьев А. И. Способ автоматической проводки судна. / Патент РФ 2021. [Электронный ресурс]: <https://findpatent.ru/patent/275/2759068.html>. Доступ 17.05.2023.
5. Zhu Qidan. The research work on the intelligent ship // The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.
6. Yan Xinping. Developments of Maritime Autonomous Surface Ships in China// The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International

High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.

7. Sawada Ryohei. Introduction to research on autonomous ships in NMRI. // The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.

8. Белогорцева М. В., Клячко Л. М., Острецов Г. Э. Способ автоматического управления движением судна. Патент RU 2292289 C1. Дата публикации 27.01.2007. Бюлл. № 7. Правообладатель: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002292289_20070127_C1_RU/. Доступ 17.05.2023.

9. Василенко И. В., Ведякова А. О. Исследование алгоритмов траекторного управления роботом манипулятором // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.62-71>.

10. Хоанг Д. Т., Пыркин А. А. Алгоритм траекторного управления движением мобильного робота без измерения координат положения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21. – № 6. – С. 858–865. DOI: [10.17586/2226-1494-2021-21-6-858-865](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-858-865).

11. Рогозин О. В., Пенской И. С. Метод траекторного управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом в задаче следования за объектом // Образовательные технологии. – 2019. – № 4. – С. 92–110. [Электронный ресурс]: <https://iedtech.ru/journal/2019/4/trajectory-flight-control/>. Доступ 17.05.2023.

12. Пшихопов В. Х., Федотов А. А., Медведев М. Ю., Медведева Т. Н., Гуренко Б. В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3 (30). – 29 с. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22843876>. EDN: TFXFED. Доступ 17.05.2023.

13. Мавлюдов М., Садовников Ю., Титов В. Интерцепторы – средство управления гидродинамическими параметрами быстрого судна// Катера и яхты. – 2000. – № 170. – С. 48–50. [Электронный ресурс]: <http://sportlib.info/Mirrors/www.katera.ru/170/page19.html>. Доступ 17.05.2023.

14. Антоненко С. В. Судовые движители: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 126 с. ISBN 978-5-7596-0745-8.

15. Hydraulic Steering & Accessories. [Электронный ресурс]: http://www.navalex.com/downloads/KOBELT_Hydraulic_Steering_&_Accessories.pdf. Доступ 17.05.2023. ●

Информация об авторах:

Кудров Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент, директор Института аэромеханики и летательной техники (ИАЛТ), директор Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, kudrov.ma@mipt.ru

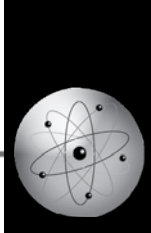
Бухаров Кирилл Дмитриевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, bukharov.kd@mipt.ru.

Махоткин Даниил Русланович – инженер, руководитель проекта Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, mahotkin.dr@mipt.ru.

Айвазов Рафаэль Сергеевич – инженер Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, aivazov.rs@mipt.ru.

Статья поступила в редакцию 08.05.2023, одобрена после рецензирования 11.07.2023, принята к публикации 14.07.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.12

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-3>

Оценка технического состояния набросных бун



Роман ТЛЯВЛИН

Роман Маратович Тлявлин

Научно-исследовательский центр «Морские берега», обособленное подразделение Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства, Сочи, Россия.

✉ TlyavlinRM@Tsnii.com.

АННОТАЦИЯ

Набросные бунны являются одним из типов сооружений инженерной защиты земляного полотна, которые в комплексе с волногасящим пляжем используются для защиты железнодорожного пути от волнового воздействия.

Целью данной работы является повышение безопасности эксплуатации железнодорожного пути на прижимных участках, подверженных волновому воздействию. При получении критериев оценки технического состояния набросных бун автор использовал методы экспериментальных исследований и обследования.

По результатам обследования набросных бун сделаны выводы о низком качестве строительства и определены основные типы дефектов как сооружений в целом, так и их

элементов. В волновом бассейне на гидроволновых моделях выполнены экспериментальные исследования по оценке пляжеудерживающей способности бун и их устойчивости к волновому воздействию. Предложено деление набросных бун на отдельные элементы по степени их весомости и получены критерии технического состояния по видам дефектов для каждого элемента рассматриваемого сооружения.

Полученные по результатам обследований и экспериментальных исследований критерии технического состояния позволяют выполнять оценку технического состояния набросных бун, что повысит безопасность эксплуатации железнодорожного пути.

Ключевые слова: берегозащитные сооружения, волновой бассейн, железнодорожный путь, земляное полотно, инженерная защита, обследование, набросная бунна, критерии технического состояния, экспериментальные исследования.

Для цитирования: Тлявлин Р. М. Оценка технического состояния набросных бун // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Абразионные процессы на морских побережьях приводят к значительным материальным последствиям и снижают безопасность эксплуатации земляного полотна железных дорог.

В Российской Федерации железные дороги построены и эксплуатируются в условиях волновой абразии на прижимных участках вдоль побережий Черного моря, озера Байкал и острова Сахалин. Для защиты прижимных участков железных дорог от волнового воздействия применяются сооружения инженерной защиты (берегозащитные сооружения), в состав которых входят и каменнонабросные буны. Каменнонабросные буны относят к активным берегозащитным сооружениям, предназначенным для удержания пляжевого материала. Искусственный пляж является «идеальным» волногасящим сооружением, но на некоторых участках берега без пляжеудерживающих сооружений (бун) существовать не может, так как интенсивно размывается, вовлекаясь во вдольбереговой поток наносов.

В соответствии с СП 277.1325800.2016¹ буны подразделяются по проницаемости, по конструкции, по материалам, из которых они возводятся, и по способу пропуска наносов. По конструкции каменнонабросные буны могут строиться из штучного камня (рис. 1) или с ядром из более мелкого камня. При этом ядро должно быть защищено от размыва более крупным однородным штучным камнем с толщиной защитного слоя не менее трёх диаметров камня. Уклон откосов боковых граней каменнонабросных бун должен быть не круче чем 1:1,5, а головного участка – не круче чем 1:2. Корневая часть буны, как правило, примыкает к волноотбойной стене.

Автором по результатам экспериментальных исследований в волновом бассейне

¹ СП 277.1325800.2016 Сооружения морские берегозащитные. Правила проектирования. Утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации № 963/пр от 16.12.2016 г. – М.: Технорма. 2017. – 58 с. [Электронный ресурс]: https://standartgost.ru/g/%D0%A1%D0%9F_277.1325800.2016. Доступ 24.05.2023.

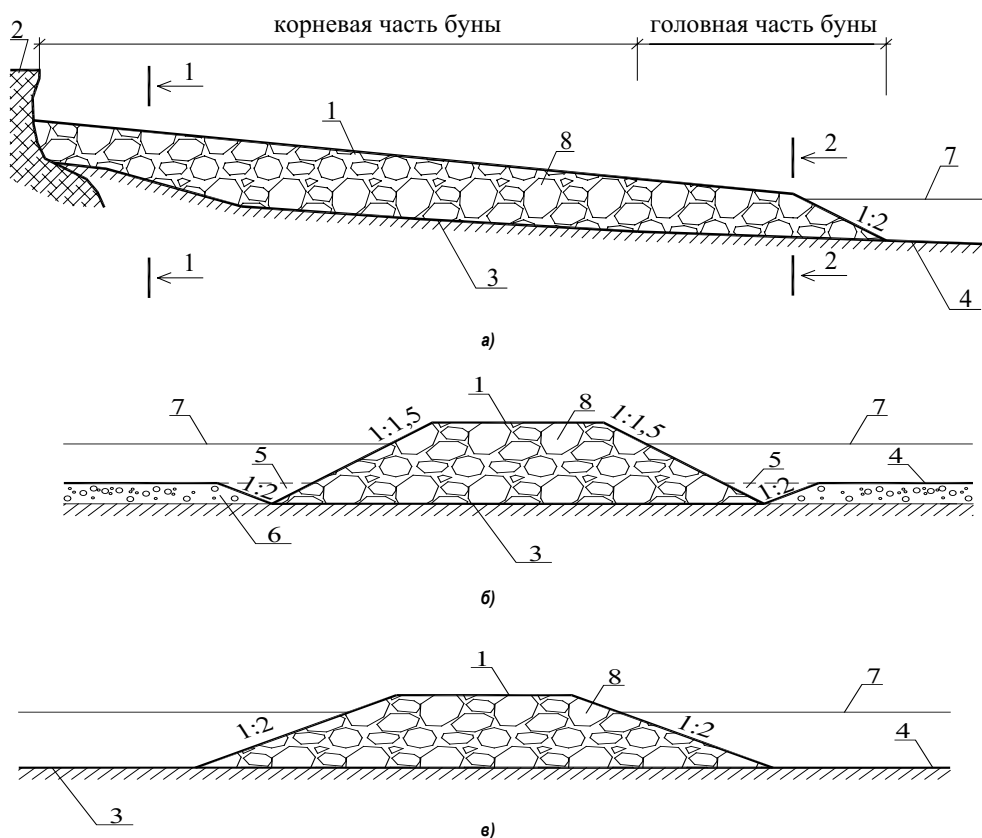


Рис. 1. Каменнонабросная бунa на скальных грунтах: а – продольное сечение; б – поперечное сечение 1–1; в – поперечное сечение 2–2; 1 – профиль буны; 2 – волноотбойная стена; 3 – скальное дно; 4 – существующее дно; 5 – обратная засыпка; 6 – пляжевый материал; 7 – уровень воды; 8 – штучный камень [выполнено автором].

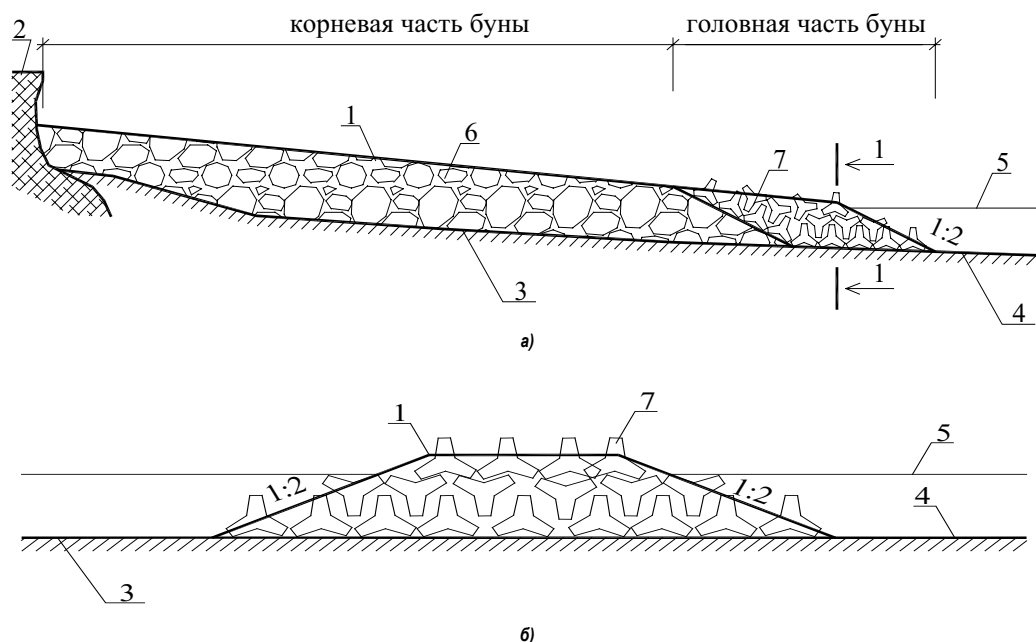


Рис. 2. Комбинированная набросная буна: а – продольное сечение; б – поперечное сечение 1–1; 1 – профиль буны; 2 – волноотбойная стена; 3 – скальное дно; 4 – существующее дно; 5 – уровень воды; 6 – штучный камень; фасонные массивы (тетраподы) [выполнено автором].

не на экспериментальной базе Филиала АО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега» и натурного обследования на участке железной дороги Туапсе – Адлер [1] многократно фиксировались разрушения головных частей каменнонабросных бун.

В работе [2] отмечается, что одной из основных причин разрушения каменнонабросных бун является качество их строительства, что подтверждается и в работах [3, 4].

Для усиления головных частей набросных бун может выполняться наброска из тетраподов, как правило, массой 5,0 т. Такие набросные буну называются комбинированными. Типовое решение по строительству комбинированных бун представлено на рис. 2.

Известна комбинированная конструкция набросной буны, когда фасонными бетонными блоками, например тетраподами, усиливается не только головная часть буны, но и боковые поверхности по контуру сооружения [5]. В данной работе для дополнительной устойчивости бетонные блоки предлагается при необходимости соединять канатами.

В работах [6, 7] описаны методы научного обоснования нормативных требова-

ний и выполнено обоснование необходимости разработки нормативного документа по использованию природного камня в гидротехническом строительстве. Приведён мировой опыт строительства гидротехнических сооружений из камня и подтверждена целесообразность его применения.

Целью описанного в статье исследования является повышение безопасности эксплуатации железнодорожного пути на прижимных участках, подверженных волновому воздействию. Рассматриваются вопросы разработки критериев для оценки технического состояния сооружений. К основным методам, на основании которых сделаны выводы при получении критериев технического состояния набросных бун, необходимо отнести: экспериментальные исследования в волновых бассейнах, выполненные на экспериментальной базе НИЦ «Морские берега», а также обследование и натурные наблюдения на участке железной дороги Туапсе – Адлер. Метод физического моделирования взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями является наиболее достоверным с точки зрения получения не только качественных, но и количественных результатов [8–12].



Рис. 3. Вид деформированных каменнонабросных бун [фото автора 07.02.2008].

При разработке ГОСТ Р 59241-2020² автором была предложена и опубликована методика оценки технического состояния сооружений инженерной защиты в условиях волнового воздействия [13–15], где подробно рассмотрены бетонные буны и волногасящие сооружения такие как: защитные волногасящие прикрития из бетонных блоков или природного камня, волногасящий пляж и набросные бермы. При этом вопросы оценки технического состояния набросных бун в работах [13–15] не рассматривались.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На участке железной дороги Туапсе – Адлер первые каменнонабросные буны были построены в 2005 году на 1933 км на перегоне Чемитоквадже – Якорная Щель в районе реки Осохой по проекту, выполненному ЗАО «Кавгипротранс». Для создания волногасящего галечного пляжа, способного погасить энергию штормовых волн, перед волноотбойной стеной проектом предусматривалась отсыпка галечного материала со средней крупностью 40–70 мм. В качестве пляжеудерживающих сооружений были применены набросные буны длиной 45 м по гребню из штучного камня. Отметки корневых частей набросных бун должны были составлять +2,6 м относительно БС (Балтийской системы высот), а головных – +0,8 м. Боковые грани бун выполнялись в виде откоса с уклоном 1:1,5 в корневой части, плавно переходящим

в уклон 1:2 в головной части. Головные части каменнонабросных бун своими откосами выходили на глубины, превышающие 3,5 м, где волны высотой более 3 м обрушались на них. Для обеспечения устойчивости каменнонабросных бун к волновому воздействию в проекте был принят штучный камень массой от 3 до 5 т каждый.

После строительства за первые три года штормами каменнонабросные буны были значительно деформированы (рис. 3).

По результатам обследования деформированных сооружений сделаны выводы, что причиной разрушения являлось некачественное строительство. К основным нарушениям необходимо отнести следующее: несоответствие геометрии построенных каменнонабросных бун проекту, не выдержаны уклоны откосов, занижены отметки в корневой и головной частях бун, ширина бун по гребню менее шести метров, крупность камня значительно ниже, предусмотренной в проекте.

Всего на участке железной дороги Туапсе – Адлер за период с 2005 по 2017 годы было построено 153 каменнонабросные буны, и уже к концу 2017 года 62,7 % требовали ремонта [1, 16, 17].

На рис. 4 показан процесс измерения крупности камня, применяемого при строительстве каменнонабросных бун. По результатам измерений получено, что средняя крупность камня в теле бун составляет от 0,5 до 1 м, а масса соответственно от 150 до 1300 кг. А в проекте было предусмотрено строительство из камня крупностью около 1,5 м и массой от 3 до 5 т.

Необходимо отметить ещё и несоответствие качества самого камня проекту, часто

² ГОСТ Р 59241-2020 Берегозащитные сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ. 2020. – 28 с. [Электронный ресурс] https://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_%D0%A0_59241-2020. Доступ 24.05.2023.





Рис. 4. Оценка крупности камня в каменнонабросных бунях [фото автора 20.07.2007].

используется камень низкой прочности и с соотношением сторон более трёх. В соответствии с ГОСТ Р 70021-2022³ при строительстве берегозащитных сооружений необходимо применять однородный по составу нелещадный камень. Отношение максимального размера каждого камня к минимальному не должно превышать 3. Это требование обусловлено устойчивостью камня на откосе при волновом воздействии. Известны случаи, когда сооружение, построенное из камня плитчатой формы, разрушалось, хотя по размеру камень соответствовал расчётам.

Для проверки влияния лещадности камня на устойчивость бун к волновому воздействию была проведена серия экспериментов в среднем волновом бассейне на экспериментальной базе НИЦ «Морские берега».

Экспериментальные исследования выполнялись в соответствии с общеизвестной методикой, описанной в работах [8, 18–20], в основе которой заложена теория подобия. При уменьшении объекта моделирования должно обеспечиваться геометрическое подобие, подобие волнового режима, поверхностных и объёмных сил. Когда на модели и в натуре одна и та же жидкость (вода), нельзя одновременно обеспечить подобие по числам Рейнольдса и Фруда. Однако для решения многих задач и не требуется одновременное подобие по обоим параметрам [21].

Экспериментальные исследования выполнялись в масштабе 1:30. Расположение голов-

ных частей бун, подверженных наибольшему волновому воздействию, совпадало с линией последнего обрушения волн. Высота волн составляла 3,6 м, а средний период – 10,2 с. Взаимодействие исходного волнения с каменнонабросной буной представлено на рис. 5.

В результате проведения эксперимента получено, что камень плитчатой формы, отсыпанный в головной части буны, по сравнению с камнем, по форме приближенным к шару, менее устойчив к волновому воздействию, и сооружение, построенное из такого камня, разрушается. На рис. 6 показан вид модели без воды по окончании опыта. Головная часть каменнонабросной буны протяжённостью 22 м была разрушена. Это привело к тому, что пляжеудерживающая способность буны ухудшилась, и ширина пляжа с проектных 35 м уменьшилась до 15. Таким образом, основная функция буны – удержание пляжевого материала – не выполняется.

Учитывая опыт наблюдения за построенными набросными бунами и выполненные экспериментальные исследования по устойчивости набросных сооружений к волновому воздействию, сделан вывод, что основной группой элементов является наброска из камня или бетонных массивов, так как потеря устойчивости отдельных элементов наброски влияет на пляжеудерживающую способность набросной буны в целом.

Предлагается деление набросных бун на отдельные элементы по степени их весомости. В составе набросных бун можно выделить две основные группы элементов с соответствующими коэффициентами весомости b_i : наброска из камня или массивов $b_i = 80 \%$ и дно перед сооружением $b_i = 20 \%$. Пере-

³ ГОСТ Р 70021-2022 Камень природный для морских берегозащитных и оградительных сооружений. Технические условия. – М.: Российский институт стандартизации. 2022. – 10 с. [Электронный ресурс]: https://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_%D0%A0_70021-2022. Доступ 24.05.2023.



Рис. 5. Взаимодействие волн с каменнонабросной буной [фото автора].



Рис. 6. Вид каменнонабросной буны по окончании эксперимента [фото автора].

углубление дна, в том числе и локальное, может привести к увеличению волнового воздействия на сооружение и к потере устойчивости отдельных элементов наброски.

Для оценки технического состояния набросных сооружений по методике, описанной в [13–15], необходимо не только разделить набросные буны на отдельные элементы по степени их весомости, но и получить критерии технического состояния по видам дефектов для каждого элемента рассматриваемого сооружения. В соответствии с [15] техническое состояние сооружения подразделяется на пять групп: от нормативного (исправного) состояния до предельного (аварийного). Коэффициент сохранности сооружения, определяемый по формуле 4.2², для нормативного (исправного) состояния составляет $a_n = 1$, а для предельного (аварийного) – $a_n = 0$.

Для определения коэффициента сохранности группы однородных элементов a_i по формуле 4.1² при выполнении комплексного обследования путём экспертной оценки необходимо назначить частное значение коэффициента сохранности отдельного элемента a_j . В случае фиксации локального переуглубления дна перед сооружением на глубину не более 0,2 м и на участке длиной не более 0,25 от диаметра камня или высоты бетонного массива присваивается работоспособное состояние элемента с $a_j = 1,0–0,8$. Предельное (аварийное) состояние с $a_j = 0,2–0$ присваивается при фиксации локального переуглубления на глубину более 0,5 м и на участке дна протяжённостью более 0,25 от диаметра камня или высоты бетонного массива.

Коэффициент сохранности отдельных элементов наброски из камня или бетонных



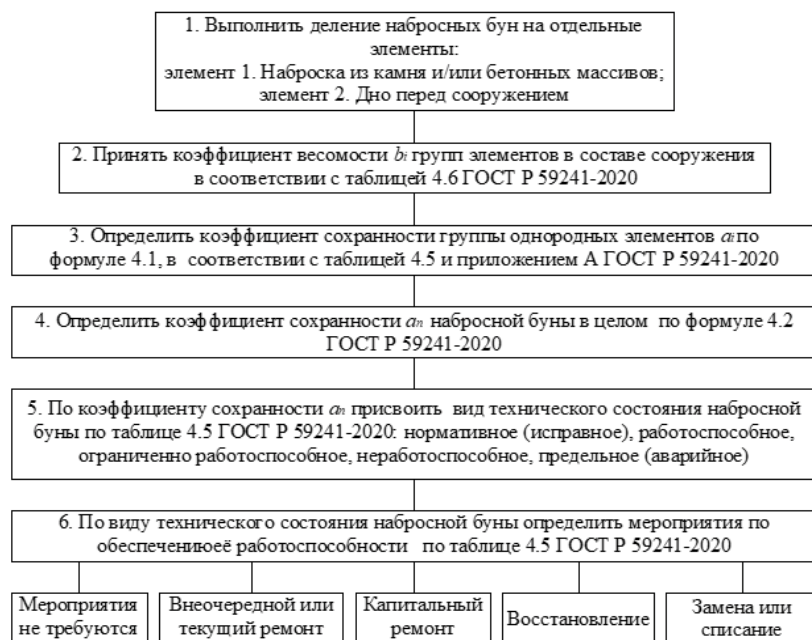


Рис. 7. Блок-схема для определения технического состояния и требуемых мероприятий по обеспечению работоспособности набросных бун [выполнено автором].

массивов необходимо назначать по видам дефектов: размывы и оползни откосов, отклонение массы и отклонение прочности камней или бетонных массивов в меньшую сторону. К работоспособному состоянию с $a_j = 1,0-0,8$ необходимо относить элементы сооружения, при которых отсутствуют размывы и оползни откосов наброски, масса элементов наброски отличается в меньшую сторону от проектной на величину не более 5 %, и отклонение прочности элемента отличается в меньшую сторону от проектной на величину не более 7 %. К предельному (аварийному) состоянию с $a_j = 0,2-0$ соответственно относят элементы сооружения с отклонением массы элементов более чем на 10 %, а с отклонением прочности – более чем на 20 % в меньшую от проектных величин сторону. Коэффициент сохранности для размыва и оползней откоса определяется экспертным путем в зависимости от их величины.

Выводы

На основании предложенных критериев построена блок-схема для определения технического состояния и требуемых мероприятий по обеспечению работоспособности набросных бун из камня и/или бетонных массивов (рис. 7).

Предложенные автором критерии для оценки технического состояния набросных бун включены в разработанный Научно-исследовательским центром «Морские берега» ГОСТ Р 59241–2020², это позволит повысить безопасность эксплуатации железнодорожного пути на участках, подверженных волновому воздействию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тлявлиня Г. В. Научно-исследовательские, обследовательские работы и инженерные изыскания в общем составе работ по комплексному обследованию береговой стороны железнодорожной линии Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Этап 2. Проведение сплошного обследования со стороны моря берегозащитных и укрепительных сооружений железнодорожного пути, с одновременным обследованием волногасящей полосы. Отчет о НИР. – Сочи: Научно-исследовательский центр «Морские берега», 2018. – 327 с.
2. Макаров К. Н., Мигоренко А. В. Побережье Сочи грозит техногенная катастрофа // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2012. – № 2 (157). – С. 34–36. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20328874>. Доступ 15.02.2023.
3. Тлявлин Р. М., Тлявлиня Г. В. Оценка состояния берегозащитных сооружений железнодорожного полотна на участке Туапсе – Адлер // Транспортное строительство. – 2017. – № 2. – С. 23–25. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30025626>. Доступ 16.02.2023.
4. Тлявлиня Г. В., Тлявлин Р. М. Проблемы проектирования и строительства берегозащитных сооружений на участке Туапсе-Адлер // Морские берега – эволюция, экология, экономика: Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня

основания Рабочей группы «Морские берега»: в 2 томах, Туапсе, 01–06 октября 2012 года / Рабочая группа «Морские берега», Российский государственный гидрометеорологический университет. Том 2. – Туапсе: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Дом – Юг», 2012. – С. 217–220. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22684119> [метаданные]; https://www.sea-coasts.ru/_files/ugd/4fee8a_b709c4a52163447ea6c97877165329a5.pdf [полный текст материалов конференции]. Доступ 16.02.2023.

5. Явна В. А., Окост М. В., Хакиев З. Б. [и др.]. Патент на полезную модель № 151362 U1 Российская Федерация, МПК E02B 3/04, E02B 3/12. Комбинированная конструкция берегозащитного сооружения. № 2014127601/13: заявл. 07.07.2014; опубл. 10.04.2015. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU151362U1.ru>. Доступ 17.02.2023.

6. Тлявлиня Г. В. Методы научного обоснования нормативных требований в области инженерной защиты транспортных сооружений от волнового воздействия // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 2 (64). – С. 80–91. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_80. EDN: YRHHNU.

7. Тлявлиня Г. В., Вялый Е. А. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № 2. – С. 53–69. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49092614>. EDN: AEFXHI. Доступ 17.02.2023.

8. Frostick, L. E., McLelland, S. J., Mercer, T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London: Taylor & Francis Group, 2011, 272 p. DOI: 10.1201/b11335 [ограниченный доступ]. ISBN 9780415609128.

9. Santamaría, M., Diaz-Carrasco, P., Moragues, M. V., Clavero, M., Losada, M. Uncertainties of the actual engineering formulas for coastal protection slopes. The dimensional analysis and experimental method. Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 2022. DOI: 10.3850/IAHR-39WC252171192022900.

10. Clavero, M., Chiapponi, L., Longo, S., Losada, M. A. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes. In: Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M. G., Faria, P. (eds) Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_11 [ограниченный доступ].

11. Ranasinghe, D. P. L., Kumara, I. G. I. K., Engiliyage, N. L., Raveenthiran, K. Effectiveness of Dummy Water Levels in Physical Models to Optimize the Toe and the Crest Level. In: Proc. 8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science Dec. 9th–12th, 2020, Zhoushan, China, pp. 42–51. [Электронный ресурс]: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=8784>. Доступ 24.05.2023. ISBN: 978-90-824846-5-6.

12. Vyaly, E., Makarov, K., Tlyavlina, G. Permeable Constructions of Artificial Islands. Power Technology and Engineering, 2022, Vol. 56, Iss. 1, pp. 52–58. DOI: 10.1007/s10749-023-01470-7 [ограниченный доступ].

13. Тлявлин Р. М. Критерии технического состояния бетонных бун // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (57). – С. 73–82. DOI 10.20291/2079-0392-2023-1-73-82.

14. Тлявлин Р. М. Проблемы обследования и мониторинга сооружений инженерной защиты береговой зоны // Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций: Материалы XI Международной науч.-практ. конференции (г. Сочи, 14–15 ноября 2019 г.). – Сочи: РИЦ ФГБОУ ВО «СГУ», 2019. – С. 244–248. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41552411> [метаданные]. EDN: T S X M Y U. https://elibrary.ru/download/elibrary_41552215_50967690.pdf [полный текст материалов конференции]. Доступ 22.05.2023.

15. Тлявлин Р. М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209.

16. Ашпиз Е. С. Комплексное обследование береговой стороны железнодорожной линии Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Этап 2. Проведение сплошного обследования со стороны моря берегозащитных и укрепительных сооружений железнодорожного пути, с одновременным обследованием волногасящей полосы. Книга 1. Результаты обследования на участке Туапсе – Шепси – Водопадный – Лазаревская. 1885 км ПК6+00–1914 км ПК0+00. Технический отчет. – М.: Некоммерческое партнерство по поддержке научной и научно-технической деятельности в Московском государственном университете путей сообщения НП «Наука-МГУПС», 2018. – 335 с.

17. Ашпиз Е. С. Комплексное обследование береговой стороны железнодорожной линии Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги. Этап 2. Проведение сплошного обследования со стороны моря берегозащитных и укрепительных сооружений железнодорожного пути, с одновременным обследованием волногасящей полосы. Книга 2. Результаты обследования на участке Лазаревская – Чемитоквадже – Якорная Щель – Лоо. 1916 км ПК3+00–1947 км ПК0+00. Технический отчет. – М.: Некоммерческое партнерство по поддержке научной и научно-технической деятельности в Московском государственном университете путей сообщения НП «Наука-МГУПС», 2018. – 275 с.

18. Шарп Д. Д. Гидравлическое моделирование: Пер. с англ. Л. А. Яскина. – М.: Мир, 1984. – 280 с.

19. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений / Под ред. В. С. Кнороза. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1967. – 236 с.

20. Тлявлиня Г. В. Лабораторные и натурные исследования в обеспечение развития нормативной базы и безопасности транспортных сооружений в условиях волнового воздействия // Транспортные сооружения. – 2022. – Т. 9. – № 4. DOI 10.15862/10SAT5422.

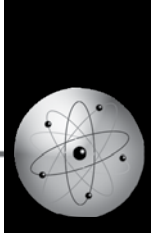
21. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости: Пер. с англ. / Под ред. чл.-кор. АН СССР О. Ф. Васильева. – М.: Энергия, 1971. – 480 с. ●

Информация об авторе:

Тлявлин Роман Маратович – кандидат технических наук, руководитель Научно-исследовательского центра «Морские берега» – обособленного подразделения Центрального научно-исследовательского института транспортного строительства, Сочи, Россия, TlyavlinRM@Tsiis.com.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023, одобрена после рецензирования 25.06.2023, принята к публикации 28.06.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4>

Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков

**Зульфия Тельмановна Фазилова***Российский университет транспорта, Москва, Россия.*✉ fazil_1905@mail.ru

SPIN-код: 9817–6928, AuthorID: 459237, ORCID: 0000-0001-5933-1208

Зульфия ФАЗИЛОВА

АННОТАЦИЯ

На сетях железных дорог эксплуатируется большое число искусственных сооружений, мостов, путепроводов, труб, лотков. Искусственные сооружения рассчитаны на длительные сроки эксплуатации, в ходе которой они нуждаются в капитальном ремонте или реконструкции с применением современных материалов и технологий. В современных условиях развития железных дорог происходит рост осевых нагрузок и скоростей движения, что повышает актуальность решения задач, связанных с динамическим воздействием поездов на искусственные сооружения и земляное полотно. В силу специфики строительства и содержания участков железнодорожного пути на подходах к мостовым сооружениям связанная с ними проблематика требует отдельного рассмотрения.

Исследование, результаты которого приведены в статье, было посвящено влиянию анизотропии верхнего строения пути на параметры динамической осадки предмостовых

участков переходной жёсткости, устроенных с применением бездонных коробов.

В проведённом исследовании железнодорожный путь в пределах переходного участка предлагается моделировать в виде набора плоских элементов постоянной толщины, каждый из которых представлен анизотропной пластиной, опирающейся на деформируемое основание со своими параметрами деформативности. Показано, что, задавая граничные условия для отдельных фрагментов конструкции пути и варьируя коэффициенты анизотропии, определяющие соотношения её механических характеристик в разных направлениях, можно подобрать требуемые параметры жёсткости железнодорожного пути в пределах предмостового участка, что позволяет в дальнейших исследованиях перейти к рассмотрению конструктивных особенностей проектирования и устройства данных конструкций.

Ключевые слова: железные дороги, искусственные сооружения, переходной участок, модуль упругости, бездонные короба, частота собственных колебаний, анизотропная пластина, метод декомпозиций, изгибающая и сдвиговая жёсткости, динамический прогиб.

Финансирование: данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта ОАО «РЖД» по Договору № 5106449 от 28.12.2022 года на развитие научно-педагогических школ на железнодорожном транспорте.

Благодарности: автор выражает искреннюю признательность своим коллегам по проведению научного исследования – доктору физико-математических наук, профессору А. А. Локтеву и кандидату физико-математических наук Э. Н. Егеревой за ценные советы и мнения при написании статьи.

Для цитирования: Фазилова З. Т. Влияние анизотропных свойств верхнего строения железнодорожного пути на параметры динамической осадки предмостовых участков // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы

На сети железных дорог Российской Федерации эксплуатируется около 83 тысяч искусственных сооружений (ИССО), из них мосты и путепроводы составляют 37 %, на долю труб и лотков приходится 59 %. Многие из искусственных сооружений нуждаются в неотложном капитальном ремонте либо реконструкции с применением современных материалов и технологий. Кроме этого, повышение осевых нагрузок и скоростей движения требует уточнения и детализации сложившихся подходов к решению задач, связанных с динамическим воздействием поездов на объекты ИССО и земляного полотна. При этом указанная проблема представляется актуальной для железных дорог большинства стран в силу большой длительности сроков эксплуатации ИССО и современных тенденций развития железнодорожного транспорта.

Места сопряжения железнодорожного пути с ИССО являются одним из основных участков резкого изменения вертикальной жёсткости пути, что приводит к ускоренному выходу из строя элементов верхнего строения пути (ВСП), увеличению времени и ресурсов, необходимых для технического обслуживания участка, а также требует применения специальных технологий строительства и содержания [1–8].

При устройстве участков переменной жёсткости используются различные конструкции, рекомендованные, в том числе и в рамках международных организаций, например ОСЖД, для создания постепенного нивелирования жёсткости подрельсового основания на подходе к ИССО [9].

Однако рост осевых нагрузок, увеличение полигона тяжеловесного и скоростного движения ставят задачу более детального исследования динамического воздействия подвижного состава на конструкцию участков переходной жёсткости с целью их оптимизации.

В целом, с точки зрения сформировавшихся подходов к научной методологии и проведению инженерных расчётов, проблемы динамического воздействия на участках различной жёсткости подрельсового основания рассматриваются путём моделирования с использованием дифференциальных расчётов, которые проводятся для двух

сегментов, соединённых переходным участком.

В работах [10–17] по результатам анализа проведённых натурных экспериментов были смоделированы железнодорожные переходные зоны для прогнозирования их краткосрочного и долгосрочного поведения под повышенной поездной нагрузкой. Результаты показали, что прогиб рельса на переходном участке с насыпи на мост оказывает значительное влияние на величину динамического воздействия колеса на рельс, а также его вертикальное ускорение, величина которого в момент прохода колеса через контрольное сечение не должна превышать $0,1g$, где g – ускорение свободного падения. Проведённый динамический анализ деформационных свойств мостового перехода и характера взаимодействия между составом и путём, позволил выявить основные факторы, влияющие на динамику процесса: скорость поездов по участку, деформацию от прогиба рельса, изменение жёсткостных характеристик подрельсового основания и др. При этом затухание вертикальных напряжений составляет 40 %–60 % на глубине 0,6 м, 80 %–90 % на глубине 2,5 м [18–21].

Цель исследования

Целью настоящего исследования являлось решение осесимметричной задачи моделирования конструкции участка переменной жёсткости из бездонных коробов, соответствующей прямому участку железнодорожного пути. Гипотезой исследования была возможность подобрать при заданном максимальном значении вертикального перемещения требуемые параметры жёсткости конструкции участка переменной жёсткости в трех основных направлениях анизотропии, что в дальнейшем позволяет сформулировать особенности проектирования и устройства данных конструкций.

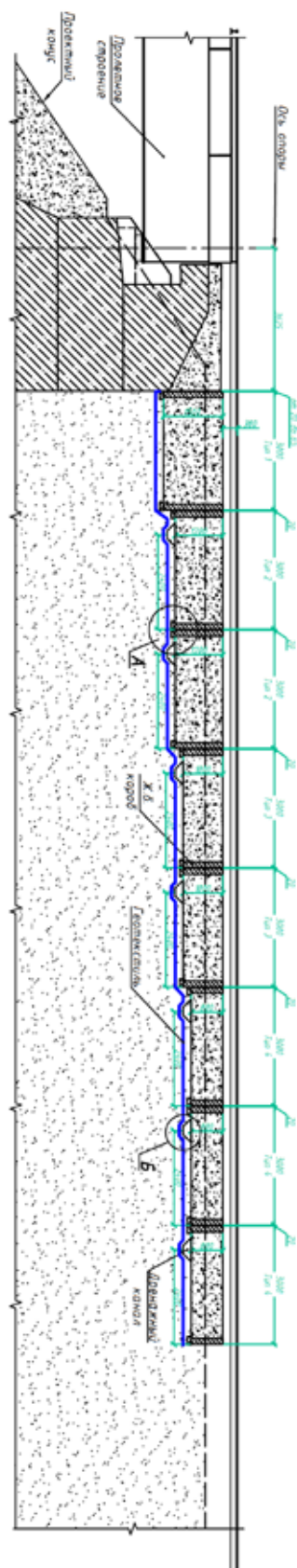
РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика исследования

Для участков повышенной осевой нагрузки предлагается применение бездонных коробов, заполняемых балластным материалом (рис. 1). Высота коробов варьируется по длине переходного участка от максимальной (около устоя моста) до минимальной (в месте сопряжения с обычным путём) в пределах



Рис. 1. Конструкция участка из бездонных коробов [схема подготовлена с участием автора].



2,5–0,8 м. При этом модуль деформации будет снижаться от места сопряжения ИССО с подходами по длине вдоль пути до 25 м от 130 МПа до 80 МПа (рис. 2).

Предлагается рассмотреть изменение частоты собственных колебаний конструкции участка переходной жёсткости для модельного плоского элемента с учётом взаимодействия с другими элементами конструкции пути, анизотропных свойств и различных граничных условий [22–25]. При этом верхнее строение железнодорожного пути и земляное полотно под ним на всю высоту насыпи представляется в виде набора слоёв постоянной толщины, плотно прилегающих друг к другу.

В отечественной и зарубежной литературе можно выделить два подхода к математическому моделированию таких сооружений. Первый подход заключается в агрегировании плоских послойных моделей с разнообразными свойствами в единую многослойную конструкцию. Второй подход основан на исследовании однослойной конструкции, для которой учитываются анизотропные свойства в различных направлениях анизотропии. Фактически изменение механических характеристик материала позволяет посредством использования приведённых величин моделировать неоднородные среды [26–28]. Модели, определяющие используемые для дальнейших расчётов уравнения, и в первом, и во втором случае необходимо дополнять граничными условиями на гранях и соприкасающихся поверхностях, а также с помощью начальных условий задавать особенности приложения динамической нагрузки от подвижного состава.

В настоящем исследовании за основу взят второй подход. Железнодорожный путь предлагается моделировать плоскими элементами, каждый из которых представлен анизотропной пластиной, опирающейся на деформируемое основание со своими параметрами деформативности. По контуру могут быть использованы различные краевые условия, варьируя которые, можно добиться хорошего соответствия реальной конструкции железнодорожного пути и её математической модели. Основными участками железнодорожного пути, для которых подходят такие, в целом не тривиальные подходы, являются участки переменной жёсткости перед и после искусственных сооружений на линейных объектах транспортной инфраструктуры.

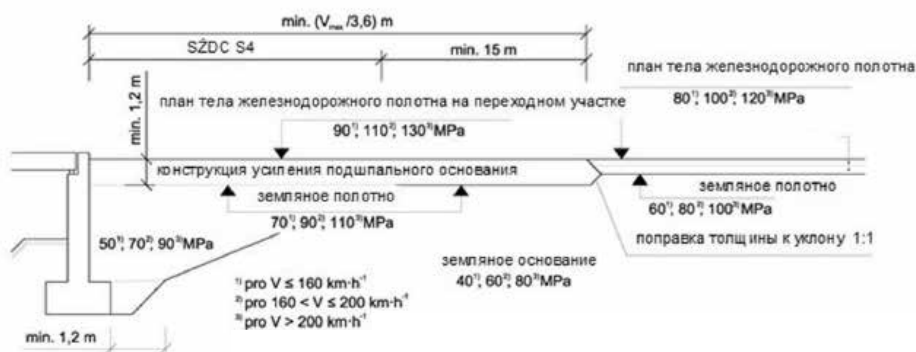


Рис. 2. Требование к конструкции переходного участка для моста с безбалластным полотном [9, рис. 23].

В качестве математической модели, описывающей динамическое поведение трансверсально-изотропной пластины, лежащей на деформируемом основании и испытывающей воздействие внешней нормальной нагрузки, имитирующей воздействие подвижного состава, предлагается использовать уравнение поперечных колебаний для трансверсально-изотропной пластины постоянной толщины, жёстко опёртой по всем четырём сторонам. Именно такое представление является наиболее приближённым при использовании конструкций железобетонных коробов, ограничивающих перемещения материала, находящегося внутри оболочки, по всем направлениям. Принимаем, что до начала приложения нагрузки плоский элемент расположен в области следующих координат $\{0 \leq x \leq l_1; 0 \leq y \leq l_2; -h \leq z \leq h\}$, а уравнение колебаний можно представить в виде:

$$A_1 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} - A_3 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta W + A_4 \Delta^2 W + P(W) = 0, \quad (1)$$

где W – поперечное смещение точек срединной плоскости пластины;

Δ – оператор Лапласа.

При этом коэффициенты анизотропии имеют вид:

$$A_1 = \rho_1;$$

$$A_2 = \rho_1^2 \left(A_{33}^{-1} + 3A_{44}^{-1} \right) \frac{h^2}{b};$$

$$A_3 = \left\{ -\rho_1 \left[2 - 2A_{11}A_{33}^{-1} - 3 \left(A_{13}^2 - A_{11}A_{33} \right) A_{33}^{-1} A_{44}^{-1} \right] \right\} \frac{h^2}{b};$$

$$A_4 = 2A_{33}^{-1} \left(A_{11}A_{33} - A_{13}^2 \right) \frac{h^2}{b};$$

$$A_5 = \frac{S}{2h} \rho_1;$$

$$A_6 = \frac{S}{2h} \rho_1 \frac{h^2}{2} \left(\rho_1 A_{44}^{-1} + 3A_{33}^{-1} \right);$$

$$A_7 = -4 \frac{S}{2h} \rho_1 A_{11} A_{33}^{-1},$$

где введены следующие обозначения:

$$P(W) = A_5 \frac{\partial W}{\partial t} + A_6 \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} + A_7 \Delta \frac{\partial W}{\partial t} - \text{отпор};$$

ρ_1 – плотность;

b – скорость поперечной волны;

$A_{11} = A_{13} = \dots = A_{nm}$ – коэффициенты анизотропии, определяющие соотношения механических характеристик элементов конструкции в разных направлениях.

В настоящем исследовании выделяются три основных направления изменения механических и геометрических характеристик конструкции: горизонтальное – вдоль рельсовых плетей, поперечное – вдоль шпал, а также вертикальное направление – вниз от уровня головки рельса.

Граничные условия для отдельных фрагментов конструкции пути в этом случае принимают вид:

$$W = \frac{\partial W}{\partial x} = 0; x = 0, l_1, \quad W = \frac{\partial W}{\partial y} = 0; y = 0, l_2. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) строится в следующем виде:

$$W(x, y, t) = W(x, y) \exp\left(\xi \frac{bt}{h}\right), \quad (3)$$

где ξ – частота собственных колебаний пластины.

Тогда уравнение (1) можно представить в виде:

$$W(x, y)(\Delta^2 + B_1 \Delta + B_2) = 0. \quad (4)$$

Здесь

$$B_1 = \frac{1}{A_4} \left(-A_3 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_1 \left(\frac{b\xi}{h} \right) \right);$$

$$B_2 = \frac{1}{A_4} \left(A_1 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^4 + A_5 \left(\frac{b\xi}{h} \right) + A_6 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^3 \right). \quad (5)$$

Для удобства представления переменных величин и нахождения геометрических соотношений используем безразмерные координаты и функции прогиба:





$$x = \frac{l_1}{\pi} \alpha; y = \frac{l_2}{\pi} \beta; W(x, y) = V(\alpha, \beta) \frac{l_1^4}{\pi^4}. \quad (6)$$

Учитывая безразмерные координаты и соотношение $\eta = l_1/l_2$, определяющее уравнение можно представить в следующем виде:

$$V(\alpha, \beta) \left(\left(\frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + 2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \eta^4 \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \right) + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right) = 0. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) воспользуемся методом декомпозиций, предполагающим разделение общей задачи на три вспомогательных, после решения каждой из которых результат предлагается агрегировать:

$$\frac{\partial^4 V_1}{\partial \alpha^4} = f_1(\alpha, \beta) \quad V_1 = \frac{\partial V_1}{\partial \alpha} = 0 \quad \alpha = 0, \pi; \\ \eta^4 \frac{\partial^4 V_2}{\partial \beta^4} = f_2(\alpha, \beta) \quad V_2 = \frac{\partial V_2}{\partial \beta} = 0 \quad \beta = 0, \pi; \quad (8)$$

$$\left[2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right] V_3 + f_1 + f_2 = 0.$$

Согласно методу декомпозиций, будем приближённо полагать, что

$$V_1 \cong V_2; V_3 = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad (9)$$

а в заданных точках пластинки произвольные функции будем искать в виде:

$$f_i(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} a_{n,m}^{(i)} \sin(n\alpha) \sin(m\beta), \quad (10)$$

где $a_{n,m}^{(i)}$ – произвольные постоянные, где $i = 1, 2$.

Общее решение вспомогательных задач будем искать в виде:

$$V_1(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(1)}}{n^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \\ + \frac{\alpha^3}{6} \psi_1(\beta) + \frac{\alpha^2}{2} \psi_2(\beta) + \alpha \psi_3(\beta) + \psi_4(\beta); \\ V_2(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(2)}}{\eta^4 m^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \frac{\beta^3}{6} \phi_1(\alpha) + \\ + \frac{\beta^2}{2} \phi_2(\alpha) + \beta \phi_3(\alpha) + \phi_4(\alpha), \quad (11)$$

где $\psi_i(\beta)$ и $\phi_i(\alpha)$ – произвольные функции.

Удовлетворяя общее решение граничным условиям и учитывая вспомогательные задачи, можно определить все произвольные функции $\Psi_i(\beta)$ и $\Phi_i(\alpha)$ через систему:

$$\begin{cases} c_{11} a_{11}^{(1)} + c_{12} a_{11}^{(2)} = 0 \\ c_{21} a_{11}^{(1)} + c_{22} a_{11}^{(2)} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где

$$c_{11} = B_1 \frac{l_1^2}{2\pi^2} \left[-1 + \frac{2}{\pi} - \eta^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \\ + B_2 \frac{l_1^4}{2\pi^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \eta^2 \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) + 1; \\ c_{12} = B_1 \frac{l_1^2}{2\pi^2 \eta^2} \left[-1 + \frac{2}{\pi} - \frac{1}{\eta^2} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \\ + B_2 \frac{l_1^4}{2\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{\eta^2} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) + 1; \\ c_{21} = 1; \\ c_{22} = -1/\eta^4.$$

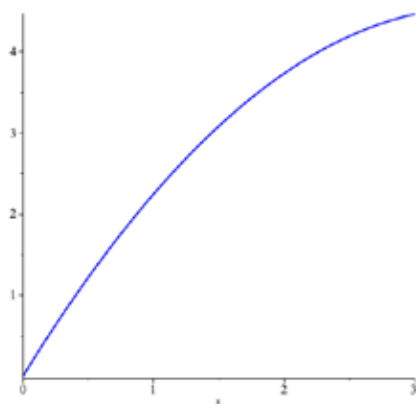
Неизвестные величины, входящие в систему определяющих функциональных уравнений, имеют не нулевое значение только при равенстве нулю главного определителя. Исходя из этого условия, можно получить характеристическое уравнение, разрешаемое относительно частот собственных колебаний плоской конструкции:

$$d_1 \xi^4 + d_2 \xi^3 + d_3 \xi^2 + d_4 \xi + d_5 = 0, \quad (13)$$

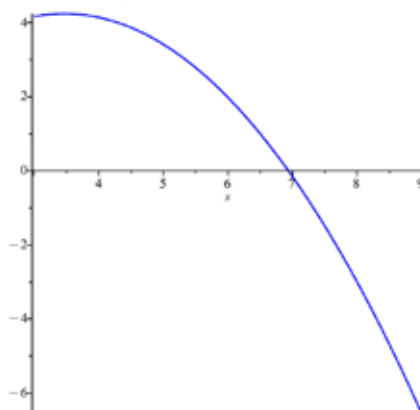
где

$$d_1 = -\frac{A_2}{A_4} \frac{l_1^4}{\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{b}{h} \right)^4; \\ d_2 = -\frac{A_6}{A_4} \frac{l_1^4}{\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{b}{h} \right)^3; \\ d_3 = \frac{l_1^2}{A_4 \pi^2 \eta^2} \left\{ \frac{A_3}{2} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{\eta^2} + 2 \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{1}{\eta^2} + 1 \right) \left(2 - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right\}; \quad (14) \\ d_4 = -\frac{l_1^2}{A_4 \pi^2 \eta^2} \left\{ \frac{A_7}{2} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{\eta^2} + 2 \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{1}{\eta^2} + 1 \right) \left(2 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \left(\frac{b}{h} \right) \right\}; \\ d_5 = \frac{2}{\eta^2} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{1}{\eta^4} - 1.$$

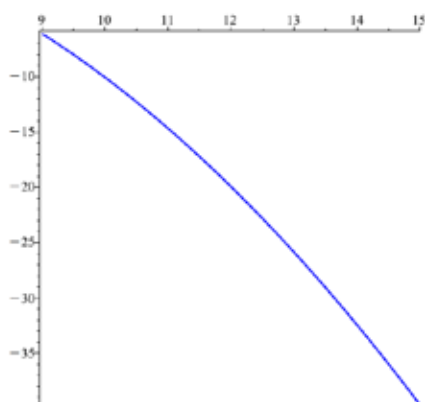
Если заменить бесконечный протяжённый плоский элемент на пластину с конечными размерами, то к описанным уравнениям можно добавить краевые условия по граням, в этом случае можно получить характеристическое уравнение относительно частот собственных колебаний. Варьируя параметры A_i и приводя их в соответствие с геометрическими и механическими характеристиками реальной конструкции железнодорожного пути, можно получить не только математическое решение инженерной задачи деформирования верхнего строе-



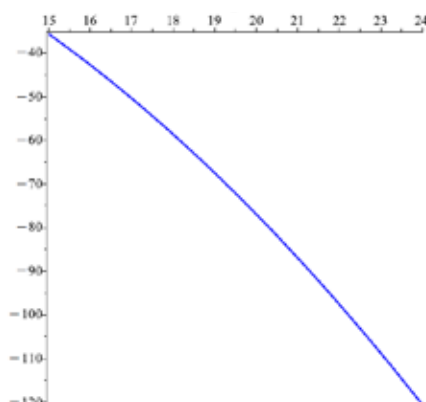
а)



б).



в).



г).

Рис. 3. Графики зависимости $W_{(x)}$ по длине участка переходной жёсткости:
а) $x = 0-3$ м; б) $x = 3-9$ м; в) $x = 9-15$ м; г) $x = 15-24$ м при значениях $A_{11} = 2$, $A_1 = 1$, $A_{33} = 2$ и $A_{44} = 2$
[графики построены при участии автора]:

A – коэффициент анизотропии; вертикальная ось (W) – величина прогиба рельса, мм;
горизонтальная ось (X) – координаты точки замера на рельсовой плети от начала рассматриваемого сегмента, м.

ния пути под подвижной динамической нагрузкой, но и апробировать различные элементы и процедуры технологических процессов содержания железнодорожного пути [29–30].

После определения частот собственных колебаний можно построить и проанализировать графические зависимости для вертикального перемещения точек медианной поверхности плоского элемента, моделирующего сегмент железнодорожного пути. Вертикальное перемещение вычисляется согласно соотношениям (3) и по факту представляет собой сумму всех возможных вертикальных перемещений (просадка, осадка, перекося, приведённый к одной из нитей и т. д.). Полу-

ченные значения могут быть сравнены с суммарными значениями некоторых величин, вносящих вклад в вертикальное перемещение точек пути и определяемых вагоном-путеизмерителем.

ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная выше математическая модель была применена для проведения практических расчётов конструкции пути в пределах участка переменной жёсткости. Первые из построенных графиков (рис. 3а, б) показывают зависимость вертикального перемещения от координаты местоположения исследуемой точки конструкции вдоль рельсовой плети. Полученные результаты позволяют опреде-



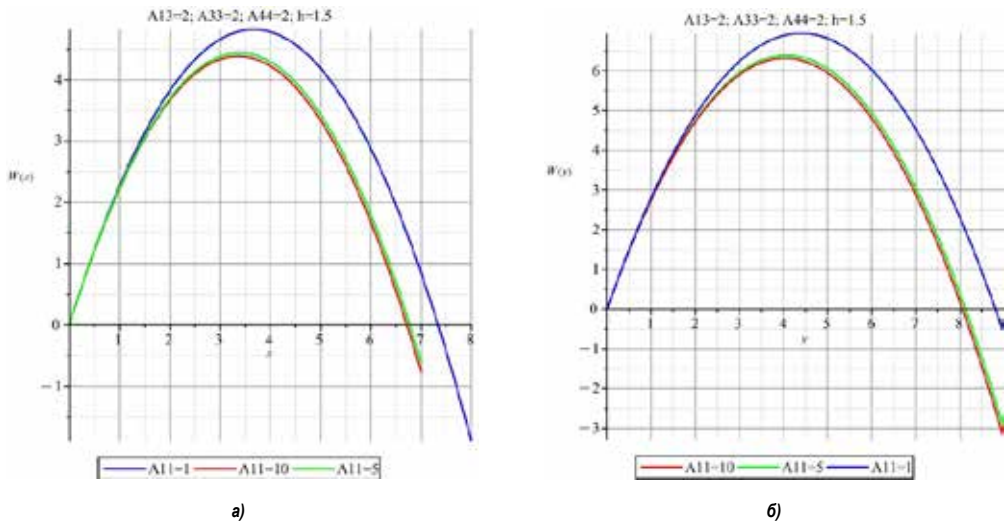


Рис. 4. Графики зависимости: а) $W(x)$ и б) $W(y)$ при разных наборах значений A_{11} [графики построены при участии автора]:
 A – коэффициент анизотропии;
 вертикальная ось – а) $(W(x))$ – зависимость прогиба от значения перемещения вдоль рельсовой цепи, мм; б) $(W(y))$ – зависимость прогиба от значения вертикального перемещения, мм;
 горизонтальная ось (X) – координаты точки замера на рельсовой плети, м.

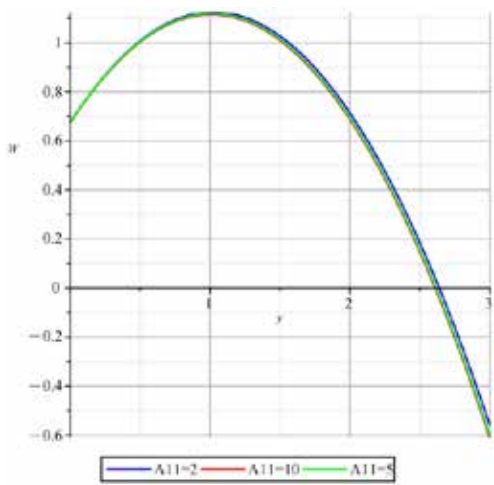


Рис. 5. График $W(y)$ при изменении A_{11} [график построен при участии автора]:
 A – коэффициент анизотропии; вертикальная ось – $(W(y))$ – зависимость прогиба от изменения жёсткости вдоль рельсовой плиты; горизонтальная ось (y) – координаты точки замера в поперечном направлении от оси пути, м.

лить места наибольших и наименьших перемещений при приложении динамической нагрузки, а также вычислить оптимальный размер сегмента конструкции железнодорожного пути (это может быть железобетонная плита, короб, кессон и т. д.) с точки зрения минимизации перемещений при фиксации механических (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и т. д.) и жёст-

костных (изгибная, сдвиговая жёсткости, цилиндрическая жёсткость и т. д.) параметров, что является одной из основных характеристик эксплуатации железнодорожного пути.

Для заданных при расчётах параметров (для вертикального перемещения можно использовать максимальные значения, указанные в отечественных и зарубежных нормативных документах; они составляют порядка 10 мм) наибольший прогиб наблюдался в точке с координатой 3 м, а наименьший – в точке с координатой 6,8 м: в этом диапазоне и должны находиться размеры в плане для элементов конструкций, усиливающих участок пути перед или после искусственного сооружения или в иных местах с увеличенной осадкой железнодорожного пути.

Серия других графических зависимостей показывает влияние на вертикальный прогиб коэффициентов анизотропии в трёх основных направлениях. В качестве аргумента, как и в предыдущем случае, выступает координата искомой точки конструкции, отсчитываемая вдоль рельсовой плиты от начала рассматриваемого сегмента (фактически, это начало железобетонного короба). Сравнивая отдельные кривые, можно отметить вклад анизотропных свойств конструкции железнодорожного пути в итоговое значение вертикального перемещения. При этом видно (рис. 4 а), что

увеличение приведённого параметра анизотропии вдоль рельсовой плети даже в два раза мало влияет на общее значение прогиба.

При увеличении жёсткости вдоль рельсов зависимость перемещения от координаты с момента возникновения максимального значения фактически параллельна характеристике с предыдущими значениями, это говорит о линейности влияния изменяемых параметров. Влияние анизотропии в вертикальном направлении (рис. 4 б) более интересно с точки зрения поведения функции прогиба: представленные графики $W_{(y)}$ пересекаются между собой практически в одной точке, величина прогиба в которой практически не зависит от параметров сцепления горизонтальных слоев между собой (именно эту характеристику можно увеличить, используя сваи или иные конструкции нагельного характера), а зависит от цилиндрической жёсткости самого железобетонного короба.

График $W_{(y)}$ при изменении A_{11} (рис. 5) также показывает незначительное влияние изменения жёсткости вдоль рельсовой плети на итоговую величину вертикального прогиба, интересным результатом является точка равенства нулю прогиба, фактически она означает геометрический размер короба в плане и может варьироваться для однопутного и двухпутного участка железной дороги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройство участка переходной жёсткости на подходах к искусственным сооружениям является необходимым элементом, позволяющим снизить риск возникновения остаточных деформаций и создающим предпосылки к сокращению расходов на текущее содержание железнодорожного пути в зоне подходов к ИССО. Устройство таких конструкций особенно актуально на участках высокоскоростного и тяжёловесного движения.

В работе рассмотрена осесимметричная задача моделирования конструкции участка переменной жесткости из бездонных коробов, соответствующая прямому участку железнодорожного пути. Задавая максимальное значение вертикального перемещения, указанное в отечественных и зарубежных нормативных документах, можно подобрать требуемые параметры жёсткости конструкции участка переменной жёсткости в трёх

основных направлениях анизотропии, что позволит в дальнейших исследованиях перейти к рассмотрению конструктивных особенностей проектирования и устройства данных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Серебряков Д. В., Конон А. А., Ганчиц В. В. Исследование колебательных процессов в земляном полотне на участках сопряжения с мостами // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 9. – С. 9–11. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30026800>. EDN: ZHBZLF [ограниченный доступ].

2. Иванова К. И., Колос А. Ф., Ван Кситонг. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути // Транспорт БРИКС. – 2023. – Т. 2. – № 1. – С. 1–7. DOI: 10.46684/2023.1.4.

3. Джоунс К. Д. Сооружения из армированного грунта. Пер. с англ. В. С. Забавина / Под ред. В. Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1989. – 281 с. ISBN 5-274-00475-X.

4. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO. German Geotechnical Society, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Germany, 2011 (first published 09.01.2012). Print ISBN:9783433029831. DOI:10.1002/9783433600931 [частично ограниченный доступ].

5. Ольховская Е. В., Серебряков Д. В. Конструкции переходного пути на подходах к искусственным сооружениям на скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралях // Сб. трудов LXXXII Всероссийской научно-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в двух томах. Том 1. – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург), 2022. – С. 47–50. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/dmmclz> [метаданные].

6. Меренченко К. В. Новые подходы к проектированию пути в зоне сопряжения земляного полотна и искусственного сооружения / Транспортное строительство. 2014. – № 6. – С. 7–9. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21673959> [метаданные].

7. Fischer, S. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. Acta Polytechnica Hungarica, 2022, Vol. 19, Iss. 3, pp. 89–101. DOI:10.12700/APH.19.3.2022.3.8.

8. Алтытников Д. С. Сравнительный анализ конструкций для усиления участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям на железных дорогах // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2017. – № 5. – С. 32–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30586243>. EDN: ZTIFFP. Доступ 26.05.2023.

9. Новые конструкции переходных участков с насыпью на мост. Документ Р 760/4 (дата вступления в силу 21.10.2016). Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД), 35 с. [Электронный ресурс]: <https://osjd.org/api/media/resources/11613>. Доступ 26.05.2023.

10. Федоренко Е. Расчёты осадки, устойчивости и стабильности земляного полотна с геосинтетическими материалами путем численного моделирования // Инженерная защита. – 2014. – № 3 (3). – С. 34–38. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23144482>. Доступ 26.05.2023.

11. Апшикур Б., Ипалаков Т. Т., Касымов Д. К. Расчёт напряженно-деформированного состояния земляного полотна, усиленного геосинтетическими материалами // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2019. –



№ 2. – С. 18–26. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44348774>. EDN: PRKKOA. Доступ 26.05.2023.

12. Дружинина О. В., Локтев А. А., Ванюшаник И. С., Федорова С. В., Климова Д. В. Обобщенные спектры реакции для проектирования мостовых переходов транспортной инфраструктуры // В сб.: Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии. Материалы VII Международной научно-практ. конференции. – Елец, 2021. – С. 329–334. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46685164> [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

13. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Решение задачи равенства деформаций вязких и упругих элементов подрельсового основания железнодорожного пути // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2022. – Т. 18. – С. 62–71. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50120155>. Доступ 26.05.2023.

14. Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*. 2011, Vol. 222, art. 17. DOI:10.1007/s00707-011-0517-8 [ограниченный доступ].

15. Сычёва А. В., Локтев А. А., Сычёв В. П. Управление жёсткостью пути на переходных участках // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 16–20. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44717335>. EDN: BDXXXI [ограниченный доступ].

16. Джанмуддаев Б. Д., Локтев А. А., Аленов К. Т., Фазилова З. Т. Поперечные колебания секции плиты в основании безбалластного пути // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 2 (81). – С. 72–78. DOI:10.30932/1992-3252-2019-17-2-72-78.

17. Виноградов В. В., Локтев А. А., Фазилова З. Т. Математическое моделирование участков переменной жёсткости перед искусственными сооружениями // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 72–85. DOI:10.30932/1992-3252-2018-16-3-7.

18. Ашпиз Е. С., Замуховский А. В., Шмаков А. П., Салмин А. О., Кузнецова А. В. Исследование армирования защитного слоя плоской георешеткой // В сб.: Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахуняца. – 2017. – С. 112–115. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xpqqxj> [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

19. Danyang Ji, Zheng Ma, Junjie Zhou, Yajun Li, Shuai Shao. A Coupled Discrete-Finite Element Method for Shear Strength Analysis of Geogrid-Reinforced Railway Ballast. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, art. ID 3685709. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/3685709>.

20. Шапран В. В. Проектирование и реконструкция участков пути с переменной жесткостью // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2013. – Т. 6. – № 6 (6). – С. 124–131. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27034714>. EDN: WTPPUX. Доступ 26.05.2023.

21. Марочка В. В., Бобошко С. Г., Тютькин А. Л. Натурные испытания участков с переходным показателем жесткости на подходах к железнодорожным мостам

// В сб. Политранспортные системы. Материалы XI Международной научно-техн. конференции. – Новосибирск, 2020. – С. 59–63. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896409&pf=1>. EDN: VPUORU [метаданные; полный текст сборника]. Доступ 26.05.2023.

22. Loktev A. A., Fazilova Z. T., Zaytsev A. A., Borisova N. L. Analytical Modeling of the Dynamic Behavior of the Railway Track on Areas of Variable Stiffness. In: *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, Vol. 1. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019 (Part of the Lecture Notes in Civil Engineering Book series, Vol. 49), 2020, Vol. 1. pp. 165–172. DOI:10.1007/978-981-15-0450-1_17 [ограниченный доступ].

23. Илларионова Л. А., Локтев А. А., Боков С. С. Динамическое воздействие экипажа на вязко-упругую плиту основания городского транспорта // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 1. – С. 52–56. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=chmokl>. EDN: CHMOKL. Доступ 26.05.2023.

24. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Обоснование эффекта притормаживания упругой волны от воздействия колес подвижного состава на рельс с локализацией волны в зоне дефекта железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 25–30. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49518278>. EDN: ZXFZPY. Доступ 26.05.2023.

25. Илларионова Л. А., Локтев А. А. Анизотропные конструкции при строительстве и ремонте железнодорожной инфраструктуры. Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2021. – Т. 17. – № 17. – С. 55–60. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795349>. EDN: KSSAYK. Доступ 26.05.2023.

26. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с. ISBN 5-277-02025-X.

27. Смирнов В. Н., Шестакова Е. Б., Чижов С. В., Антонюк А. А., Ледяев А. П., Индейкин А. В., Евтюков С. А. Динамическое взаимодействие высокоскоростных поездов с пролетными строениями и гибкими опорами Инженерно-строительный журнал. – 2017. – № 8 (76). – С. 115–129. DOI: 10.18720/MCE.76.11.

28. Chattopadhyay, S. Permanent indentation effects on the impact response of elastic plates. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1987, Vol. 82, Iss. 2, pp. 493–497. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.395450> [ограниченный доступ].

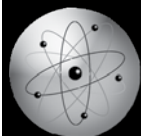
29. Loktev A. A., Gridasova E. A., Zapol'nova E. V. Simulation of the railway under dynamic loading. Part 1. Ray method for dynamic problem. *Contemporary Engineering Sciences*. 2015, 8 (17–20), pp. 799–807. DOI:10.12988/CES.2015.57204.

30. Loktev, A., Sychev, V., Gridasova, E., Stepanov, R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters. Chapter in: *Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications*. [Eds.]: Uvarova, L. A., Nadykto, A. B., Latyshev, A. V. Series: Theoretical and Applied Mathematics, 2017, Vol. 1, pp. 291–307. [Электронный ресурс]: <https://novapublishers.com/shop/nonlinearity-problems-solutions-and-applications-volume-1/> [ограниченный доступ].

Информация об авторе:

Фазилова Зульфия Тельмановна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного строительства Российского университета транспорта, Москва, Россия, fazil_1905@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023, одобрена после рецензирования 23.06.2023, принята к публикации 10.07.2023.



Разгрузочно-сегрегационная установка песчаникового бута с энергонезависимым приводом комплектующего оборудования



Алёна Юрьевна Ляшенко

Шахтинский автодорожный институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Шахты, Ростовская область, Россия.

✉ alyona_lyashenko@mail.ru.

ORCID 0000-0001-8581-7156

Алёна ЛЯШЕНКО

АННОТАЦИЯ

Для автодорожной отрасли важны снижение себестоимости и энергопотребления, а также рекуперация энергии в технологических установках. Для решения этой проблемы в одном из производственных звеньев отрасли – производстве щебня, который является важным строительным материалом в автодорожной отрасли, – предлагается создание автономных энергетических установок, основанных на рекуперации кинетической энергии автосамосвалов, а именно разгрузочно-сегрегационной установки ДСК с энергонезависимым приводом комплектующего оборудования.

Энергонезависимая разгрузочно-сегрегационная установка осуществляет разделение исходного сырья на начальной стадии производства при энергонезависимом режиме эксплуатации, используя рекуперацию кинетической энергии разгружаемых автомобилей. После загрузки песчаникового бута в приёмный бункер, установка активизирует процесс сегрегации материала на крупную и мелкую фракции. Полученные фракции подаются на соответствующие питатели для последующей технологической переработки. Преимуществом установки является автономность приводов вибратора

и питателей, что способствует росту эффективности процесса разгрузки и сегрегации песчаникового бута, снижению энергозатрат на производство готового продукта.

Оценка функциональных возможностей энергонезависимого гидропривода разгрузочно-сегрегационной установки выполнена для гидромоторов сегрегационного и транспортирующего оборудования. В качестве базового оборудования принят пластинчатый питатель КМ ПП-2–10–60Б, который способен обеспечить непрерывную и равномерную подачу исходного сырья. Рассчитан объём рабочей жидкости в гидроаккумуляторе, подача которой обеспечивается гидродомкратами. Результаты показали, что два гидродомкрата с заданными параметрами способны обеспечить необходимую подачу. Количество энергии, накапливаемой в гидроаккумуляторе при загрузке материала, определено. Рассчитанная мощность гидромотора позволяет его использование в питателе. Оценена экономическая эффективность установки с автономным приводом, учитывая режим работы, количество смен и тариф на электроэнергию.

Ключевые слова: автомобильный транспорт, дорожное строительство, песчаниковый бут, дробильно-сортировочное оборудование, разгрузочно-сегрегационная установка, процесс сегрегации, процесс рекуперации, автономные энергетические установки.

Для цитирования: Ляшенко А. Ю. Разгрузочно-сегрегационная установка песчаникового бута с энергонезависимым приводом комплектующего оборудования // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-21-3-5>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Автодорожная отрасль является одной из важнейших отраслей экономики практически любой страны, где имеются автомобильные дороги. Щебень – наиболее широко используемый автодорожной отраслью продукт добычи и переработки нерудных строительных материалов. Технология производства щебня включает в себя два основных этапа: первый этап – это добыча каменного бута, а второй – переработка бута на щебень. Для переработки добытого карьерным способом песчаникового бута применяются дробильно-сортировочные установки (ДСУ). ДСУ предназначена для первичной переработки и подготовки добытого песчаникового бута к промышленному использованию.

Снижение себестоимости единицы производимой комплексами дробильно-сортировочного оборудования продукции как приоритетное направление, реализуемое при разработке новой техники, наравне с повышением конкурентоспособности ведёт и к росту сбыта высокопрочного щебня и песка из отсевов дробления песчаникового бута. Анализ решаемых задач в области дробильно-сортировочного оборудования показывает, что сокращение расходов на энергопотребление является наиболее значимой задачей^{1, 2}. Ведь именно энергозатраты составляют наибольшую долю в общей себестоимости единицы производимой продукции [1; 2].

Одним из эффективных способов снижения энергопотребления процессов обогащения полезных ископаемых является реализация процесса рекуперации в технологических установках, которая позволяет сохранить часть энергии в виде генерированной и аккумулированной кинетической энергии и вернуть её обратно в технологическую цепочку^{3, 4}.

Увеличение объёма рекуперированной энергии затруднено несколькими факторами, среди которых можно выделить следующие: отсутствие приёмников энергии рекуперации в некоторых случаях и недостаточное использование имеющихся резервов реализуемых технологий.

Создание и внедрение автономных энергетических установок, основанных на принципе рекуперации кинетической энергии автосамосвалов, производящих доставку песчаникового бута в приёмный бункер комплекса дробильно-сортировочного оборудования на переработку, один из инновационных путей решения поставленной задачи.

Цель статьи – представить результаты разработанных автором предложений по созданию энергонезависимого гидропривода разгрузочно-сегрегационной установки на примере двух гидромоторов сегрегационного и транспортирующего оборудования, дать оценку функциональных возможностей предлагаемого решения, представить соответствующие технические и экономические расчёты.

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. – М., 2020. – С. 93. [Электронный ресурс]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003>. Доступ 28.05.2023.

² Карьеры-производители щебня песчаника в Ростовской области. [Электронный ресурс]: <https://nedra61.ru/proizvoditeli-shebnya-peschanika>. Доступ 28.05.2023.

³ Корчевский А. Н., Назимко Е. И., Серафимова Л. И., Науменко В. Г. Подготовительные процессы при обогащении полезных ископаемых. Дробление, измельчение, грохочение и классификация: Учебное пособие. – Донецк, 2017. – 180 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/books/18315>. Доступ 28.05.2023.

⁴ Тихонов О. Н. Теория разделения минералов: Учебник для вузов. – СПб.: СПГИИ (ТУ), – 2008. – 514 с. ISBN 978-5-94211-309-4. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/books/19923>. Доступ 28.05.2023.

Таблица 1

Гранулометрический состав песчаникового бута при паспорте на бурение скважин станками типа СБУ-100Г и СБШ-250 МН [3]

СБУ-100Г		СБШ-250 МН	
Размер фракции, мм	Содержание фракции, %	Размер фракции, мм	Содержание фракции, %
0÷5	2	0÷10	1
5÷20	9	10÷20	2
20÷40	12	20÷25	1
40÷60	9	25÷60	3
60÷70	4	60÷100	5
70÷80	3	100÷150	6
80÷180	22	150÷200	4,7
180 и более (до 300)	39	≥ 200	77,3

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание предлагаемой энергонезависимой разгрузочно- сегрегационной установки

В песчаниковом буге для производства щебня количество кусков, не превышающих средний размер, достигает 50 % в общем объёме (табл. 1) [3].

Экономически нецелесообразным является подача всего исходного сырья питателем загрузочного бункера комплекса дробильно-сортировочного оборудования в дробилку первичного дробления, включая куски, которые не превышают средний размер [4–15].

Технический результат предлагаемой разработки – повышение эффективности приёмного бункера за счёт трансформации в разгрузочно-сегрегационную установку, осуществляющую сегрегацию исходного сырья на начальной технологической стадии производства песчаникового щебня при энергонезависимом режиме эксплуатации за счёт рекуперации кинетической энергии разгружаемых автомобилей.

В предлагаемой энергонезависимой разгрузочно-сегрегационной установке эстакада для подъезда автотранспорта (рис. 1), выполняется в виде поворотной платформы 1 и опирается на гидродомкраты 2. В приёмном бункере 3 для реализации сегрегационной функциональности спускной стенки 4 используется изогнутая поверхность S-образной формы, которая закрепляется на боковых стенках бункера с помощью шарнира. Для более эффективного и плавного спуска материала спускная стенка 4 оборудована амортизатором 5 с вибратором, который включает гидромотор 6 и дебаланс 7 на валу. Для регулирования скоростного режима частиц, скатывающихся по спускной стенке 4, на равном расстоянии друг от друга закреплены поперечные элементы 17. В конвейерном днище 8 приёмного бункера 3 реализуется двухпитательная система 9 и 10 с приводами в виде гидромоторов 11 и 12.

Гидродомкраты 2 поворотной платформы 1 гидролинией 13, оснащённой обратным клапаном 14, через трёхпозиционный распределитель 15 соединены с гидроаккумулятором 16.

Приёмно-сегрегационная установка используется следующим образом. Перед началом работы приёмно-сегрегационной

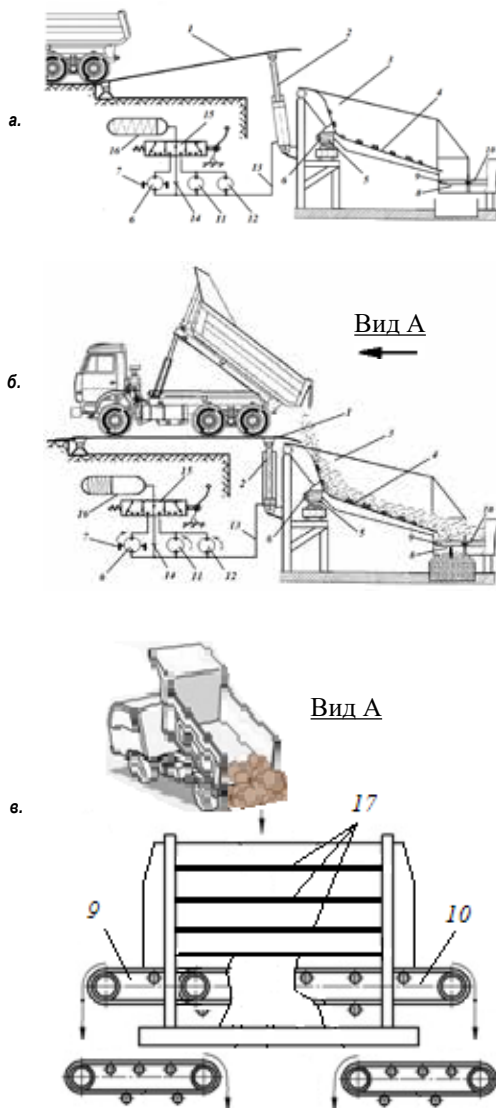


Рис. 1. Конструктивно-гидравлическая схема разгрузочно-сегрегационной энергетической установки: а – исходное состояние; б – загрузка приёмного бункера; в – то же, вид А.

установки штоки гидродомкратов 2 выдвинуты. Поворотная платформа 1 установлена под углом к горизонту. Трёхпозиционный распределитель 15 находится в нейтральном положении, чем обеспечивается соединение гидродомкратов 2 с гидроаккумулятором 16.

Под весом автотранспорта с исходным материалом, подаваемого по эстакаде к месту загрузки приёмного бункера 3, поворотная платформа 1 воздействует на штоки гидродомкратов 2, приводит их в движение, и штоки втягиваются. При этом рабочая жидкость вытесняется из поршневой полости и по гидролинии 13 поступает в гидро-



аккумулятор 16, чем обеспечивается его зарядка.

После загрузки исходного материала в приёмный бункер 3 автотранспорт съезжает с эстакады. При этом обратный клапан 14 запирает гидролинию и исключает самопроизвольную разрядку гидроаккумулятора 16.

Для активизации процесса скатывания частиц исходного материала по спускной стенке 4 распределитель 15 переводится в левую рабочую позицию. Этим обеспечивается соединение гидроаккумулятора 16 через распределитель 15 с гидромотором 6 и далее с гидродомкратами 2 и истечение рабочей жидкости из гидроаккумулятора 16 в гидродомкраты 2. Штоки гидродомкратов 2 начинают выдвигаться, платформа 1 – поворачиваться. Вибратор в виде гидромотора 6 с установленным на вал дебалансом 7 создаёт вибрационные колебания. Колебания передаются через амортизатор 5 спускной стенке 4.

Под воздействием гравитационной силы исходный материал с крупными и мелкими частицами движется вниз, за счёт вибрации и трения крупные частицы поднимаются, тогда как мелкие остаются на поверхности спускной стенки 4. Поперечные элементы 17, расположенные на всём пути движения мелких частиц, замедляют их скорость, что способствует улучшению сепарации и повышению качества конечного продукта.

В результате такого процесса мелкие частицы, достигая нижней грани спускной стенки 4, перемещаются с меньшей скоростью, в отличие от крупных кусков, которые скатываются со значительно большей скоростью. За счёт этого мелкие частицы попадают на питатель 9, а крупные частицы – на питатель 10, которые осуществляют подачу соответствующих фракций материала на конвейеры последующей технологической цепочки. При этом питатель 9 предназначен для подачи материала, не превышающего средний размер, в то время как питатель 10 обеспечивает подачу крупной фракции материала.

Для подачи питателями 9 и 10 прошедшего сегрегацию материала распределитель 15 переводится в правую рабочую позицию. Этим обеспечивается соединение гидроаккумулятора 16 через распределитель 15 с гидромоторами 11 и 12 и далее с гидродомкратами 2. Накопленная в гидроаккумуляторе 15

энергия потоком рабочей жидкости обеспечивает пуск гидромоторов 11 и 12 и кинематически связанных с ними транспортирующих органов питателей 9 и 10.

Таким образом, предлагаемая разгрузочно-сегрегационная энергетическая установка с конструктивными элементами генерирования и аккумуляции энергии в процессе загрузки исходного сырья в бункер выгодно отличается от существующих аналогов тем, что такое её исполнение обеспечивает выполнение приводов вибратора и питателей автономными и способствует снижению энергозатрат на производство единицы готового продукта.

Оценка функциональных возможностей энергонезависимого гидропривода разгрузочно-сегрегационной установки

Для оценки возможности оснащения гидромоторами сегрегационного и транспортирующего оборудования установки при его энергонезависимом режиме эксплуатации выполнен расчёт параметров элементов автономного гидропривода⁵ (рис. 2).

В качестве базового оборудования принят пластинчатый питатель КМ ПП-2-10-60Б⁶ (рис. 2).

Пластинчатый питатель КМ ПП-2-10-60Б используется горнорудными, горно-обогатительными и строительными предприятиями для обеспечения непрерывной и равномерной подачи сыпучих крупнокусковых, глинистых материалов без предварительного отбора более мелких кусков (табл. 2).

Для обеспечения заданной скорости вращения гидромотора $n_{\text{гм}}$ необходим расход рабочей жидкости $Q_{\text{гм}}$ (см³/мин):

$$Q_{\text{гм}} = n_{\text{гм}} \cdot V_{\text{гм}} / \eta_v,$$

где $n_{\text{гм}} = 500$ – число оборотов гидромотора (об/мин); $V_{\text{гм}} = 10$ – объём рабочей камеры гидромотора (задаётся в пределах от 5 см³ до 250 см³); $\eta_v = 0,9$ – коэффициент объёмных потерь (КПД) (для гидромоторов он находится в диапазоне 0,85–0,95).

⁵ Попова О. И., Попова М. И., Новокшенов С. Л. Расчёт объёмного гидропривода: Учебное пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,0 Мб). – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. – 88 с. [Электронный ресурс]: https://bf.cchgeu.ru/upload/iblock/ea1/g8hwpv5eupry482r9bieh1foh13rzwy3/UP_Raschet-gidroprivoda_MZHiG.pdf. Доступ 28.05.2023.

⁶ Канмаш КМ ПП-2-10-60 Б: технические характеристики, описание, обзор. [Электронный ресурс]: https://exkavator.ru/excapedia/technic/kanmash_km_pp-2-10-60_b. Доступ 28.05.2023.

Подставив значения, получаем:

$$Q_{гм} = (500 \cdot 10) / 0,9 = 5555 \text{ см}^3/\text{мин.}$$

Время работы питателя T_n по выдаче из бункера крупнокускового сыпучего материала, загруженного одним автосамосвалом, определяется по формуле (мин):

$$T_n = 60 \cdot M_{гп} / \rho_n \cdot \Pi_n,$$

где $M_{гп} = 15210$ – масса перевозимого автосамосвалом груза⁷, кг; $\rho_n = 2500$ – объёмный вес песчаника в разрыхлённом состоянии, кг/м³; $\Pi_n = 75$ – производительность пластинчатого питателя, м³/ч.

Подставив значения, получаем:

$$T_n = 60 \cdot 15210 / 75 \cdot 2500 = 4,87 \approx 5 \text{ мин.}$$

Объём рабочей жидкости $V_{га}$ в гидроаккумуляторе, обеспечивающий работу гидромотора в течение времени T_n , определяется по формуле (см³):

$$V_{га} = Q_{гм} \cdot T_n = 5555 \cdot 5 = 27775 \text{ см}^3.$$

Подача рабочей жидкости в гидроаккумулятор обеспечивается гидродомкратами.

Следовательно, объём рабочей жидкости $V_{га}$ в гидроаккумуляторе должен соответствовать суммарному объёму поршневых полостей гидродомкратов $\Sigma V_{гд}$:

$$V_{га} = \Sigma V_{гд} = 0,25\pi \cdot D_n^2 \cdot S_n \cdot N_{гд},$$

где D_n – диаметр поршня гидродомкрата, см; S_n – ход поршня гидродомкрата, см; $N_{гд}$ – количество гидродомкратов.

При количестве гидродомкратов $N_{гд} = 2$ и ходе поршня гидродомкрата $S_n = 60$ см диаметр поршня гидродомкрата D_n определяется по формуле (см):

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{га}}{\pi \cdot S_n \cdot N_{гд}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 27775}{\pi \cdot 60 \cdot 2}} = 17 \text{ см} \approx 20 \text{ см.}$$

Как видно из результатов расчётов, два гидродомкрата с конструктивными параметрами: диаметром поршня гидродомкрата $D_n = 200$ мм; ходом поршня гидродомкрата $S_n = 600$ мм – способны обеспечить необходимую подачу рабочей жидкости в гидроаккумулятор.

Рассчитаем количество энергии E , накапливаемой в гидроаккумуляторе предлагаемой установки при загрузке материала в бункер, по формуле (Дж):

$$E = M_A \cdot g \cdot S,$$

где $M_A = 26500$ – полная масса автомобиля, кг; $g = 9,8$ – ускорение свободного падения, м/с²; $S_n = 0,6$ – ход поршня гидродомкрата, м.

⁷ Автомобильный завод «Урал»: Модельный ряд бортовых автомобилей. [Электронный ресурс]: <https://uralaz.ru/models/>. Доступ 28.05.2023.



Рис. 2. Расчётная схема гидропривода пластинчатого питателя.

Подставив значения, получаем:

$$E = 26500 \cdot 9,8 \cdot 0,6 = 155820 \text{ Дж.}$$

Накопленное в гидроаккумуляторе количество энергии обеспечивает работу гидромотора питателя мощностью $N_{гм}$ (Вт):

$$N_{гм} = E / (60 \cdot T_n) = 155820 / (60 \cdot 4,87) = 533,26 \text{ Вт} \approx 0,5 \text{ кВт.}$$

Экономическая эффективность

Оценивая экономическую эффективность установки с автономным приводом пластинчатого питателя, принимаем: D_r – режим работы установки в год, 260 дней; $N_{см}$ – количество смен в сутки, 2 см; $t_{см}$ – продолжительность смены в сутки, 8 час; $T_{эл}$ – тариф на электроэнергию составляет 5,1 руб./кВт·час.

Годовая экономическая эффективность \mathcal{E} от внедрения установки с автономным приводом пластинчатого питателя составляет, руб./год:

$$\mathcal{E} = N_n \cdot D_r \cdot N_{см} \cdot t_{см} \cdot T_{эл} = 0,5 \cdot 260 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5,1 = 10608 \text{ руб./год.}$$

Таблица 2

Техническая характеристика пластинчатого питателя КМ ПП-2–10–60Б

Ёмкость бункера, куб. м	20
Максимальный размер куска транспортируемого материала, мм	500
Производительность, м ³ /ч	75
Ширина полотна, мм	1000
Скорость движения полотна, м/с	0,08
Мощность двигателя, кВт (двухскоростной)	2,8
Число оборотов, об/мин	500
Редуктор	1 Ц2У-250-40-12 У2
Масса питателя (с приводом и без бункера), кг	16000
Расстояние между осями приводного и натяжного валов, мм	6000
Высота – без бункера	3300
Ширина – без бункера	3580
Длина – без бункера	7800



ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая разгрузочно-сегрегационная энергетическая установка комплекса дробильно-сортировочного оборудования, обладающая конструктивной новизной, в процессе подачи по эстакаде автотранспорта к месту загрузки приёмного бункера позволяет генерировать и аккумулировать кинетическую энергии и в последующем возвращать её обратно в технологическую цепочку.

2. Реализация процесса рекуперации в разгрузочно-сегрегационной энергетической установке обеспечивает выполнение приводов вибратора и питателей бункера со спускной вибрационно-сегрегационной стенкой автономными и способствует снижению энергозатрат на производство единицы готового продукта.

3. При установленном на питателе двигателе мощностью 2,8 кВт накапливаемой в гидроаккумуляторе предлагаемой установки энергии E явно недостаточно. Полученный результат предполагает поиск новых решений повышения энергетической составляющей предлагаемого автономного привода пластинчатого питателя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Степанов В. М., Кузьмина С. В. Устройство рекуперации электроэнергии // Известия ТулГУ. Технические науки. – Вып. в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – С. 79–80. [Электронный ресурс]: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2010_03_part_5.pdf [полный текст номера]. Доступ 28.05.2023.
2. Ляшенко Ю. М., Рыжиков В. А., Ревякина Е. А., Ляшенко А. Ю., Зубрилова А. М. Обоснование конструкции системы рекуперативного торможения транспортного средства // Грузовик. – 2017. – № 2. – С. 3–6. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/xyeooz>. EDN: XYE00Z. Доступ 28.05.2023.
3. Ляшенко Ю. М., Ляшенко А. Ю. статистические исследования оборудования для производства карьерных работ при добыче нерудных материалов в условиях Ростовского региона // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 117–120. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16754079>. EDN: OCQJKN. Доступ 28.05.2023.
4. Блехман И. И., Хайман В. Я. О теории вибрационного разделения сыпучих смесей // Изв. АН СССР. Механика. – 1965. – № 5. – С. 22–30. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25494982>. EDN: TIDAGB [метаданные].
5. Ромашев О. А., Кусков Б. Б., Львов В. В. Интенсификация сепарации полезных ископаемых с использованием вибрационной сегрегации // Записки Горного

института. – С.-Петербург. – 2013. – Т. 202. – С. 118–121. [Электронный ресурс]: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5669/3553>. Доступ 28.05.2023.

6. Алешина А. П., Огурцов В. А., Гриценко М. А., Огурцов А. В. Расчётно-экспериментальное исследование сегрегационного механизма миграции ансамбля частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении // Вестник ИГЭУ. – Вып. 1. – 2015. – С. 50–54. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22952930>. EDN: TINGJZ. Доступ 28.05.2023.

7. Балдаева Т. М. Эффективность предварительного отсева мелких классов при вибрационной классификации // Обогащение руд. – Санкт-Петербург. – 2017. – № 5. – С. 3–6. DOI: 10.17580/or.2017.05.01 [метаданные].

8. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник / Колл. авторов под ред. В. А. Баумана // Машиностроение. – 1970. – 548 с.

9. Lyashenko, Y. M., Voronova, E. Y., Lyashenko, A. Y. Methodical Basics for Calculation of Receiving and Segregation Hopper for Sand Rubble. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering, 2022, pp. 788–798. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_77 [ограниченный доступ].

10. Leeuwener, M. J., Eksteen, J. J. Computational fluid dynamic modeling of two phase flow in hydrocyclone. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, Vol. 108, No. 4, pp. 231–236. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Jacobus-Eksteen-2/publication/290185402_Computational_fluid_dynamic_modelling_of_two_phase_flow_in_a_hydrocyclone/links/58537f1c08ae95fd8e1d7e78/Computational-fluid-dynamic-modelling-of-two-phase-flow-in-a-hydrocyclone.pdf. Доступ 28.05.2023.

11. Лаптев Ю. В. Горнотехнические факторы, определяющие закономерности процесса сегрегации горных пород при отсыпке отвалов // Маркшейдерия и недропользование. – 2007. – № 1. – С. 33–41.

12. Лаптев Ю. В. Исследование динамики выгрузки горной массы из кузова автосамосвала // Уральский горнопромышленный форум: Горное дело. Оборудование. Технологии: сб. докладов/ КОСК «Россия». Выставочный центр; ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 133–136.

13. Огурцов В. А. Моделирование движения частиц над поверхностью сита виброгрохота // Строительные материалы. – 2008. – № 8. – С. 72–76. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11762430>. EDN: JXKILN [метаданные].

14. Карпенко М. М., Пелевин Л. Е., Богдьявичус М. Перспектива использования гидравлического энергосберегающего привода // Диагностика и ремонт. Техно-технологические проблемы сервиса. – 2017. – № 3 (41). – С. 7–12. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312826>. EDN: YMKEIZ. Доступ 28.05.2023.

15. Xiaocong Li, Silu Chen, Chek Sing Teo, Kok Kiong Tan, Tong Heng Lee. Data-Driven Modeling of Control Valve Stiction Using Revised Binary-Tree Structure. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, Vol. 54 (1), pp. 330–337. DOI: 10.1021/ie5031369. ●

Информация об авторе:

Ляшенко Алёна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент Шахтинского автодорожного института (филиала) Южно-Российского государственного политехнического университета (ЮРГПУ (НПИ)) имени М. И. Платова, Шахты, Ростовская область, Россия, alyona_lyashenko@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.04.2023, одобрена после рецензирования 30.06.2023, принята к публикации 04.07.2023.



УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА



МОБИЛЬНОСТЬ

66

Доступность внутренних перелётов: гипотеза методики оценки.



МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

74

Перевозка зерна: малые порты и железные дороги.



ВСМ

85

Типизация проектов развития: продолжение исследований.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.7

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-6>

Определение стандарта транспортной доступности для внутренних пассажирских авиаперевозок

**Илья Вадимович Урюпин***Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия.**✉ iuryupin93@yandex.ru.**ORCID 0000-0001-7258-754x***Илья УРЮПИН****АННОТАЦИЯ**

Транспортные системы, в частности, авиационная, занимают важное место в развитии любого современного государства. Эффективное проектирование таких систем оказывает положительное влияние на социально-экономическую составляющую любой страны. Качество транспортной системы может быть оценено через её доступность для населения. В настоящее время одной из важных проблем долгосрочного развития авиатранспортной системы Российской Федерации является определение универсального показателя, позволяющего оценить транспортную доступность и её возможный целевой стандарт.

В статье предлагается подход к оценке авиатранспортной доступности при помощи математического

моделирования. В качестве критерия используются два показателя: потенциальное число пассажиров в зонах подбора каждого аэропорта и время пассажира в системе. Разработана методика определения предлагаемых индикаторов. Применение подхода по оценке авиатранспортной доступности демонстрируется на сети 2019 года.

Также приведён пример целевой (моделируемой) сети внутренних пассажирских авиаперевозок, позволяющей существенно повысить авиатранспортную доступность. На основе полученных результатов в работе предложены целевые стандарты значений авиатранспортной доступности для Российской Федерации.

Ключевые слова: авиатранспортная система, транспортная доступность, математическое моделирование.

Для цитирования: Урюпин И. В. Определение стандарта транспортной доступности для внутренних пассажирских авиаперевозок // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 66–73. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-6>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Социально-экономический успех любой страны напрямую зависит от развития и эффективности её транспортных систем [1; 2], в частности авиационной. Одними из ключевых характеристик транспортной системы является её доступность [3; 4] и связность [5–7]. Известна по меньшей мере одна попытка государственных органов задать критерии доступности транспортной услуги для долгосрочного развития транспортной системы. Например, в докладе,¹ говорится о том, что к 2050 г. 90 % граждан Европейского Союза должны иметь возможность совершить поездку «от двери до двери» не более чем за четыре часа. В том виде, в котором сформулирована цель развития европейской транспортной системы, заложено три фактора: первый – принцип «от двери до двери» – отражает так называемый холистический подход к проектированию транспортных систем [8]; второй – целевое значение не распространяется на всё население (порядка 50 млн. человек будут находиться за пределами установленных стандартов); третий – выбор абсолютного временного значения – ясно отражает географические особенности региона. Расстояние между четырьмя крайними столицами в континентальной Европе (Лиссабон, Таллин, Хельсинки и Афины) не превышает 3400 км (пять часов полётного времени).

В отличие от зарубежных стран, в Российской Федерации пока не сложилось единого представления о критериях оценки качества транспортной системы, ни в изолированном – только авиационный сегмент, ни в общем, включающем наземные участки, виде. Официально утверждённые показатели для авиатранспортной системы (АТС)² – например уровень мобильности, количество линий, облетающих Москву – являются важными, но недостаточно чётко определяющими транс-

портное качество национальной сети показателями.³

В настоящее время экспертным сообществом только обсуждаются подходы к определению универсального критерия [9–11], который мог бы объективно оценить транспортную доступность [12] АТС и задать её целевые значения.

Целью исследования является разработка методического подхода к оценке транспортной доступности пассажирских авиаперевозок для определения её целевых значений.

В качестве единого критерия транспортной доступности внутренних пассажирских авиаперевозок автором предлагается рассматривать два дополняющих друг друга показателя: *потенциальное число пассажиров* и *время пассажира в системе*. Первый показатель характеризует саму по себе возможность долететь до нужного ему пункта назначения: аэропорты и в начальном, и в конечном пунктах доступны и до них можно добраться по дороге; существуют перевозчики, которые выполняют рейсы в/из первого и последнего аэропорта, а на маршруте следования возможно совершить одну или несколько пересадок. Временной же показатель описывает способность АТС доставить пассажира из одного пункта назначения в другой за определённое время и с не более чем заранее заданным числом пересадок.

На основе *математического моделирования* [13; 14], с использованием статистических данных, разработана методика расчётов предлагаемых показателей единого критерия транспортной доступности. Получена оценка авиатранспортной доступности сети 2019 года. Выбор 2019 года обосновывается тем, что

¹ European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Directorate-General for Research and Innovation, Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs, Publications Office. – 2011. [Электронный ресурс]: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/296a9bd7-fef9-4ae8-82c4-a21ff48be673/language-en>. Доступ 23.04.2023.

² Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. [Электронный ресурс]: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>. Доступ 23.04.2023.

³ Кроме отмеченных автором, Транспортная стратегия содержит большое количество понятий и индикаторов развития транспортной системы, мобильности населения, в том числе авиационной. Так, в Транспортной стратегии впервые определены такие понятия, как «авиационная подвижность», «местная воздушная перевозка», «опорная сеть аэродромов (аэропортов) гражданской авиации», «региональная воздушная перевозка», «социальный стандарт транспортного обслуживания граждан», «транспортная доступность» и другие. В числе прогнозируемых итогов реализации Транспортной стратегии: «транспортная доступность столицы соседнего субъекта Российской Федерации – не более 5 часов»; «возможность перемещения в пределах 12 часов между всеми городами Российской Федерации с населением более 100 тыс. человек». Среди индикаторов достижения целей Транспортной стратегии, в частности, «авиационная подвижность жителей удалённых и труднодоступных районов» с соответствующими показателями, и другие. – прим. ред.





Рис. 1. Иллюстративный пример фрагмента карты достижимости населённых пунктов [выполнено автором].

он наиболее полно отражает устоявшуюся АТС РФ. Последующие 2020–2021 гг. для АТС характеризуются изменениями, связанными с внешними факторами, в том числе COVID19.

Приведён пример моделирования целевой сети на 2035 год, позволяющий улучшить показатели транспортной доступности относительно уровня 2019 года и задать их возможный целевой стандарт.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика определения транспортной доступности

Разработанный методический подход к определению транспортной доступности подразумевает два этапа. На первом этапе, с помощью моделирования зоны подбора каждого аэропорта, определяется потенциальное число пассажиров в АТС. Под «зоной подбора» понимается потенциальное число пассажиров, которое можно отнести к конкретному аэропорту. Второй этап посвящён расчёту временных затрат пассажира конкретного аэропорта.

1. *Потенциальное число пассажиров* PP_i аэропорта X_i , $i = 1, \dots, N$ – определяется как число жителей (в долях от общего населения страны), которым доступна национальная авиатранспортная система:

$$PP_i = \frac{Z_i}{Pop_{RF}}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где Pop_{RF} – численность населения Российской Федерации;

Z_i – зона подбора i -ого аэропорта;

$N \in N^*$ – множество всех аэропортов РФ.

Потенциальное число пассажиров в целом для АТС РФ может быть определено как:

$$PP = \sum_{i=1}^N PP_i, \quad N \in N^*. \quad (2)$$

В общем случае численность населения населённого пункта, рядом с которым расположен аэропорт, не совпадает с его зоной подбора. Кроме того, зачастую рядом с населённым пунктом может находиться несколько аэропортов. Поэтому определение размеров зон подбора Z_i , $i = 1, \dots, N$ выделяется как отдельная подзадача.

Для определения населения в зонах подбора применяется математическая модель [15], в которой в качестве основной меры преодоления пространства берётся время подвоза до аэропорта. Время поездки от населённого пункта до аэродрома определяется с учётом протяжённости существующей дорожной сети. В качестве верхней границы удалённости населённого пункта от аэродрома берётся расстояние в 500 км по ортодромии. Максимальное допустимое время в дороге до аэропорта ограничивается пятью часами. Выбор такого временного ограничения обусловлен большой протяжённостью территории Российской Федерации, а также неравномерным распределением населения и объектов наземной инфраструктуры. В качестве примера можно привести территорию Еврейского автономного округа, где отсутствуют аэропорты. Наиболее крупным и близким аэропортом является Хабаровск, находящийся в другом регионе, при этом автомобильная поездка потребует порядка пяти часов, что подтверждает величину выбранного верхнего ограничения.

При моделировании с помощью весовой функции [15] также учитываются находящиеся в радиусе 500 км альтернативные аэродромы. Привлекательность того или иного аэродрома для населённого пункта зависит от частоты рейсов и удалённости и выражается в виде весовых коэффициентов, за счёт чего происходит распределение населения по зонам подбора аэропортов.

На рис. 1 представлен в качестве иллюстративного примера фрагмент полученной автором карты достижимости (в рамках пяти часов поездки до аэропорта) населённых пунктов до пунктов полёта. Синими и фиолетовыми точками⁴ обозначены аэродромы и вертодромы. Зелёными, жёлтыми, оранжевыми и красными точками – в зависимости от удалённости – окрашены населённые пункты. Для красных точек достижимость аэропорта отсутствует или составляет более пяти часов. Зелёными обозначены пункты, находящиеся в непосредственной близости от аэродромов.

Решение задачи выделения зон подбора для каждого из аэропортов страны позволяет решить основную задачу – определение существующего или перспективного диапазона значений транспортной доступности национальной АТС.

2. *Время пассажира в системе* TS_i для аэропорта X_i , $i = 1, \dots, N$ определяется как максимальное значение из минимальных времён, за которое из данного X_i аэропорта можно долететь до любого X_j , $j = 1, \dots, M$ аэропорта из множества $M \subseteq N - I$ доступных аэропортов с не более чем заданным количеством k пересадок на l маршрутах:

$$TS_i = \max_{j=1, \dots, M} \min_{l=1, \dots, L} T_{ij}^l, \quad (3)$$

$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, l = 1, \dots, L, N, M, L, \in N^*$.

В формуле (3) T_{ij}^l – время, затрачиваемое на перевозку из X_i аэропорта в X_j с не более чем k пересадками; L – множество возможных маршрутов достижимости аэропорта X_j из заданного.

Очевидно, что при фиксированном k существует вероятность попасть из X_i в X_j несколькими способами. Неединственность связи характерна и для прямого маршрута ($k = 0$), так как возможно наличие нескольких рейсов, отличающихся как по времени выполнения, так и по времени перелёта (рис. 2).

Минимизация в (3) обеспечивает поиск лучшего времени перелёта среди всех маршрутов с разным допустимым количеством пересадок для пары $X_i \rightarrow X_j$. А максимизация позволяет получить верхнюю оценку времени перевозки среди лучших (минимальных) для аэропорта X_i .

⁴ Цветная версия доступна на Веб-сайте журнала. – прим. ред.

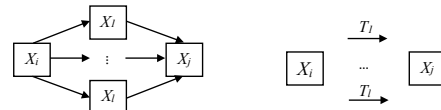


Рис. 2. Иллюстрация неединственности маршрутов из X_i в X_j (не является результатом, носит иллюстративный, поясняющий характер [создана автором]).

Общее время перевозки T_{ij} для одного из возможных l маршрутов с k пересадками можно определить как:

$$T_{ij} = \sum_{n=0}^k (t_n + \tau_n), \quad (4)$$

где t_n – время перелёта на одном из сегментов маршрута;

τ_n – время ожидания рейса.

В равенстве (4), если время прямого перелёта между двумя любыми аэропортами может быть получено из статистических данных, например, регулярного расписания внутренних авиаперевозок, то определение допустимого времени на ожидание рейса τ_n становится дополнительной задачей.

Так, время ожидания рейса перед полётом и сегментами маршрута можно рассчитать из годовых частот на линиях для X_i аэропорта отправления как отношение количества дней в году к количеству выполненных перевозок. Тогда время ожидания рейса для i -го аэропорта можно определить как:

$$\tau_i = \frac{365 \cdot T}{R_{ij}}. \quad (5)$$

В (5) $T = \{0; 12; 24\}$ – коэффициент пропускной способности (общий для системы);

R_{ij} – количество рейсов на сегменте маршрута ($k > 0$) или прямой линии ($k = 0$) из X_i в X_j .

Коэффициент пропускной способности позволяет получить время ожидания в трёх срезах: при 0 – время на ожидание рейса отсутствует; при 12 – время ожидания, равное среднему времени; при 24 – максимальное время ожидания. Иными словами, эти три среза соответствуют: первый – идеально синхронизированному расписанию по всей системе (без учёта ожидания), второй – синхронизированному частично (многосегментные перелёты с сетевым перевозчиком на большинстве сегментов); третий – максимально разбалансированное расписание (коммерческая связность сети полностью отсутствует).

В качестве альтернативной оценки времени ожидания рейса может использоваться



диапазон значений от 40 до 180 минут. Согласно⁵, нижняя граница пересадочного окна – минимальное стыковочное время (MCT – minimum connection time) составляет порядка 30–40 минут. Верхняя граница напрямую зависит от стандартов, принятых каждым аэропортом и авиакомпаниями. Для крупных, современных аэропортов время на пересадку в среднем составляет порядка 1–3 часов. Однако при таком подходе необходимо учитывать время отправления каждого рейса в каждом аэропорте на основе регулярного расписания пассажирских авиаперевозок.

Кроме определения времени ожидания, важным параметром для расчёта временного показателя покрытия сети является максимальное допустимое число пересадок – k . Современные системы бронирования билетов допускают рейсы с не более чем тремя пересадками. Однако с учётом географических особенностей страны, а также неравномерного распределения численности населения предлагается поднять ограничение числа возможных пересадок до пяти.

Поиск всех T_{ij} осуществляется с помощью формирования множества всех возможных маршрутов из X_i в другие аэропорты сети. Множество всех маршрутов получается из объединения прямых маршрутов с маршрутами, имеющими одну и более пересадок. Для получения маршрута с пересадкой используется декартово произведение прямых рейсов (связь «многие ко многим»). После на полученные маршруты накладываются ограничения:

- соответствие аэропорта прибытия относительно аэропорта вылета:

$$\{X_i \rightarrow X_j \mid X_i \rightarrow X_n, X_m \rightarrow X_j, n = m\}; \quad (6)$$

- исключение циклов одного или нескольких сегментов в маршруте:

$$\{X_i \rightarrow X_j \mid X_i \neq X_j\}. \quad (7)$$

Маршруты, рейсы по которым не удовлетворяют указанным критериям, не рассматриваются. Два аэропорта, для которых не нашлось ни одного маршрута, удовлетворяющего критериям, считаются недостижимыми. Для получения маршрутов с более чем одной пересадкой используется увеличение

числа декартовых произведений прямых рейсов с учётом ограничений (6), (7) для каждого нового плеча. К итоговому множеству всех рейсов, содержащих маршруты с $k = 0, 1, \dots, 5$ пересадками, применяется выборка, позволяющая получить лучшие (минимальные по времени до каждого X_j) рейсы для каждого X_i . Также для каждого пункта вылета ставится в соответствие население, находящееся в зоне подбора – потенциальное число пассажиров (PP). Далее осуществляется выбор максимального времени, затраченного на перевозку, среди пунктов вылета, обеспечивающих определенную долю населения России.

В отличие от PP , временной показатель TS или «способность» долететь не имеет чётко заданного диапазона значений. Прежде всего потому, что его нельзя рассматривать в отрыве от географических характеристик страны и особенностей расселения населения по её территории. Ортодромическое расстояние между двумя самыми удалёнными аэропортами (Симферополь и Менделеево (о. Кунашир)) составляет 8067 километров. При средней маршрутной скорости реактивного ВС 800 км/час время в пути между этим двумя пунктами составит, с учётом реального маршрута, не менее 12 часов. Это значение задаёт некий ориентир минимального теоретического значения TS для 100 % граждан Российской Федерации.

Оценка транспортной доступности сети 2019 года

Для определения диапазона реалистичных значений показателей доступности авиатранспортной системы России была проведена диагностика уже достигнутых её параметров. В качестве базовой транспортной системы для расчётов показателей доступности выбрана АТС 2019 года. Количество доступных пересадок ограничено пятью. Время ожидания рейса определено исходя из средних годовых частот ($T = 12$). На графике (рис. 3) автором представлен результат расчётов предлагаемых показателей доступности – график зависимости PP от TS для всей АТС.

Результаты моделирования показали, что при заданных граничных условиях не существует аэропорта, который был бы связан со всеми другими аэропортами страны.

Как видно из графика, половина населения страны находится друг от друга в восьми часах

⁵ International Air Transport Association (IATA). Minimum Connect Time (MCT) User Guide. [Электронный ресурс]: https://www.iata.org/contentassets/638f0938b3dd451b872a1d8357755421/minimum-connecting-time-user-guide_version-1.1.pdf. Доступ 24.04.2023.

маршрутного времени при передвижении только авиационным транспортом (без учёта наземного сегмента). Затем наблюдается бурный рост связности сети: при увеличении времени нахождения пассажира в путешествии на 20 % (до 10 часов), доля связанного авиацией населения растёт более чем на 40 %. Затем потенциал подбора пассажиров на относительно компактной и густонаселённой части страны исчерпывается, и недостатки сложившейся АТС начинают проявляться самым очевидным образом. В пределах заявленного ранее ориентира – 12–15 часов живёт менее 3/4 граждан России. В то же время, более 19 млн человек (13 %) живёт на дистанции более 24 часов от остальной части страны.

Резервы повышения доступности сосредоточены в двух направлениях. Во-первых, смещение кривой распределения влево, то есть сокращение временного показателя покрытия, и вверх – увеличение доли населения с фиксированным временем оказания транспортной услуги.

Оценка транспортной доступности целевой сети 2035 года

Вместе с оценкой транспортной доступности АТС 2019 года рассмотрено применение предлагаемых показателей транспортной доступности на целевой (моделируемой) маршрутной сети 2035 года. Моделирование сети внутренних авиаперевозок основывается на числе имеющихся сейчас связей конкретного аэропорта с другими аэропортами страны. Главным критерием качества совокупной маршрутной сети является обеспечение минимального времени путешествия для максимально возможной доли населения страны.

Целевую авиатранспортную систему предлагается рассматривать как трёхранговый граф. Пункты полёта первого ранга образуют «опорную» сеть и имеют связи друг с другом по принципу «каждый с каждым». В этот сегмент отнесены 12 аэропортов (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Краснодар, Новосибирск, Омск, Красноярск, Якутск, Самара, Ростов-на-Дону, Иркутск, Хабаровск), на которые приходится больший пассажиропоток как между самими аэропортами опорной сети, так и транзитный из других сегментов АТС.

Ко второму рангу относятся 133 аэропорта, связанных с узлами 1 ранга, частично друг



Рис. 3. Достигнутые показатели авиатранспортной доступности на 2019 г. [результат моделирования показателей авиатранспортной доступности на 2019 г., полученный автором].

с другим и аэропортами 3 ранга. Эта группа является принципиально важным сегментом, обеспечивающим скорость передвижения по всей сети.

Остальные пункты маршрутной сети составляют группу 3 ранга, которые связаны только с аэропортами второго ранга и не имеют прямой связи с сетью маршрутов первого ранга. Аэропорты этого сегмента являются «тупиковыми» и замыкают (открывают) собой только последнее (первое) плечо в маршрутной сети страны. Этот сегмент АТС характеризуется 247 аэродромами и посадочными площадками. Ранжированное представление пунктов полёта было разработано также в виде карты, иллюстративный фрагмент которой представлен на рис. 4.

Предлагаемая реорганизация авиатранспортной сети подразумевает переход к «хабовой» системе, то есть сокращение эксплуатации прямых линий в пользу рейсов с пересадками. При таком подходе происходит отказ от эксплуатации беспосадочных линий с малым трафиком, одновременно с чем формируются новые авиасвязи на маршрутах, где в настоящий момент прямое авиасообщение отсутствует, но потенциального пассажиропотока достаточно для ежедневного рейса.

Оценка потенциального пассажиропотока между городами определяется с помощью множественной регрессии [16]. В перечень влияющих факторов вошли стандартные для подобных моделей генерации трафика уровень доходов и численность населения в пунктах вылета и прилёта.

При моделировании сети и перераспределении потоков приняты следующие допущения:

- эксплуатация линии обязательно подразумевает выполнение как минимум 300 рейсов в год;
- эксплуатация линии начинается с воздушным судном минимально доступной





Рис. 4. Территориальное расположение пунктов полёта по рангам [выполнено автором].

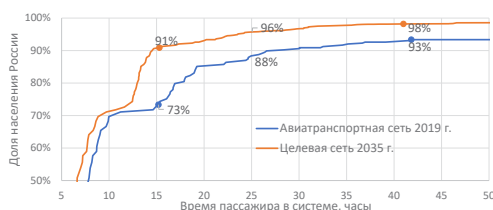


Рис. 5. Фактические и целевые значения показателей авиатранспортной доступности авиатранспортной системы России [итоговый результат, получен и выполнен автором].

пассажировместимости (19 мест для линий, протяжённостью до 800 км);

- при достижении планового уровня коэффициента загрузки судна на линии вводится второй рейс, а не увеличивается пассажироместимость;
- замена воздушного судна на большее производится при увеличении пассажиропотока до уровня насыщения двух рейсов в день;
- максимальная расчётная частота на линии – не более четырёх ежедневных рейсов;
- линии из аэропортов 3 ранга заканчиваются в аэропортах 2 ранга; для повышения уровня коммерческой загрузки допускается до двух промежуточных посадок;
- связи между двумя аэропортами 2 ранга, находящимися в ареале одного и того же хаба (до 1000 км), организуются со стыковкой в хабе в том случае, если пассажиропоток на них недостаточен для прямого рейса;
- увеличение протяжённости пути не должно превышать 50 %;
- связи между аэропортами 2 и 1 ранга, существовавшие в первый год моделирования, сохраняются на весь период.

В результате изменения структуры авиатранспортной системы, показатели транспортной доступности были существенно повышены (рис. 5). Несмотря на то, что добиться

полной связности всей сети не удалось, количество граждан России, которые не могли бы воспользоваться доступом ко всем без исключения аэропортам страны, уменьшится. Если в настоящее время при довольно мягких ограничениях на качество перелёта вся аэропортовая сеть недоступна 10 млн человек, то формирование широтной цепочки хабов и концентрация регионального потока в них снизит этот показатель более чем в три раза.

Ещё более значительные улучшения наступят в сегменте не экстремально длинных и сложных авиационных связей. Для 50 % населения время путешествия друг до друга сократится почти на 1 час 20 минут, а для 91 % вместо сегодняшних 73 % время нахождения в самолёте и ожидания в аэропортах суммарно не превысит 15 часов.

На основе полученных результатов моделирования авиатранспортной системы, целевые стандарты транспортной доступности могут быть установлены в следующих пределах:

$$7 \text{ часов} \leq (PP = 90 \%) \leq 15 \text{ часов.}$$

Установление нижнего предела TS преследует цель стимулировать развитие авиатранспортной системы в западной части страны. Достижение этого показателя будет означать снижение маршрутного времени практически на 15 % для половины населения страны. Установление и достижение верхнего целевого показателя TS приведёт к тому, что возможностью получения транспортной услуги в пределах 15 часов смогут воспользоваться на 25 млн человек больше, чем в настоящее время.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

В работе представлена методика оценки авиатранспортной доступности внутренних

пассажирских перевозок, основанная на двух критериях: потенциальном числе пассажиров и времени пассажира в системе. С помощью предложенного подхода получена оценка транспортной доступности для авиатранспортной сети 2019 и 2035 годов. Результаты показали, что в 2019 году для 50 % процентов населения страны время оказания транспортной услуги (время пассажира в системе) находится в пределах 8 часов, для 75 % населения время возрастает до 16 часов, а для 90 % верхняя граница составит 28 часов. Для повышения качества транспортной доступности и определения её целевых значений проведено моделирование целевой авиатранспортной системы на 2035 год. Предложена трёхранговая модель сети. Оценка транспортной доступности моделируемой сети на 2035 год показала, что для 50 % населения время в системе может быть снижено до 7 часов, а для 90 % время в системе ограничится 15 часами, что практически вдвое улучшает оценку сети 2019 года. Полученные значения показателей могут рассматриваться в рамках приведённой модели как целевые стандарты авиатранспортной доступности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бардаль А. Б. Оценка качества транспортных услуг для населения // Сб. трудов конференции «Современные социально-экономические процессы: проблемы, тенденции, перспективы». – 2020. – С. 12–17. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45601033>. EDN: WAQCGI. Доступ 15.02.2023.
2. Baron, A. Air transport efficiency and its measures. Prace Instytutu Lotnictwa, 2010, Iss. 3 (205), pp. 119–132. [Электронный ресурс]: https://ilot.lukasiewicz.gov.pl/wp-content/uploads/2011/03/PIL_205.pdf. Доступ 15.02.2023.
3. Горбунов В. П. Эволюция представлений о транспортной доступности // Бюллетень транспортной информации. – 2019. – № 8. – С. 10–14. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/thilwp>. Доступ 15.02.2023.
4. Неретин А. С. Транспортное положение и доступность территорий Европейской России // Дисс... канд. геогр. наук. – М.: Ин-т географии РАН, 2018. – 193 с.
5. Тархов С. А. Изменение связности пространства России (на примере авиапассажирского сообщения). – М. – Смоленск: Ойкумена, 2015. – 154 с. ISBN 978-5-93520-084-8.
6. Дутов А. В., Ключков В. В., Рождественская С. М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и её регионов // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2019. – № 14–2. – С. 43–48. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41381676> [платный доступ].
7. Горшкова И. В., Ключков В. В. Экономический анализ перспектив развития воздушного транспорта в малонаселённых регионах России // Проблемы прогнозирования. – 2011. – № 6 (129). – С. 36–52. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/scn/009162/14689402.html>. Доступ 15.02.2023.
8. Van Nes, R. Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach, 2002, 304 p. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Rob-Nes/publication/35732146_Design_of_multimodal_transport_networks_a_hierarchical_approach/links/00b49531ec16c5283a000000/Design-of-multimodal-transport-networks-a-hierarchical-approach.pdf. Доступ 15.02.2023.
9. Дубовик В. О. Методы оценки транспортной доступности территории // Региональные исследования. – 2013. – № 4. – С. 11–18. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21118992>. Доступ 15.02.2023.
10. Чистяков П. А., Фадеев М. С., Дмитриев М. Э. и др. Интегрированная транспортная система // Центр стратегических разработок. – М., 2018. – 278 с. [Электронный ресурс]: <https://www.csr.ru/uploads/2018/05/Report-Traffic-Infrastructure-2.0.pdf>. Доступ 15.02.2023.
11. Ковалева Е. Н. Интегральная транспортная доступность как показатель качества транспортного обслуживания // Журнал университета водных коммуникаций. – 2011. – № 3. – С. 171–175. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17037866>. Доступ 15.02.2023.
12. Егшин С. Ф., Смирнов А. В. Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-3-78-90>.
13. Janic, M. Air transport system analysis and modelling. CRC Press, 2000, 318 p. ISBN 9780429176623.
14. Washington, S., Karlaftis, M. G., Mannering, F., Anastasopoulos, P. Statistical and econometric methods for transportation data analysis. 3rd Edition. Chapman and Hall / CRC, 2020, 496 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429244018>.
15. Сухарев А. А., Власенко А. О., Урюпин И. В. Моделирование и оценка доступности местных и региональных авиаперевозок для населения РФ в интересах формирования требований к перспективным образцам авиатехники / Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей. Труды V научно-практ. конференции (04 декабря 2019 г., Москва) / Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова Рос. акад. наук, НИЦ «Ин-т им. Н. Е. Жуковского»; под общ. ред. Дутова А. В., Новикова Д. А. – М.: ООО «Гарант-Инвест», Изд-во «Перо», 2020. – С. 188–196. [Электронный ресурс]: <https://www.nrczh.ru/upload/iblock/609/6095c04074cfffac654ea0c41a068d399.pdf>. Доступ 15.02.2023.
16. Richmond, S. B. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis. J. Air L. & Com., 1955, Vol. 22, 434 p. [Электронный ресурс]: <https://scholar.smu.edu/jalc/vol22/iss4/4>. Доступ 15.02.2023.

Информация об авторе:

Урюпин Илья Вадимович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия, uryupin93@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 10.03.2023, одобрена после рецензирования 17.05.2023, принята к публикации 19.05.2023.





Анализ конкурентоспособности малых портов Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных перевозках: технологические аспекты, оптимизационная задача транспортного типа



Максим КОЛЕСНИКОВ



Виктор БОГАЧЕВ



Вячеслав ЗАДОРЖНИЙ



Максим БАКАЛОВ

*Максим Владимирович Колесников¹, Виктор Алексеевич Богачев²,
Вячеслав Михайлович Задоружный³, Максим Владимирович Бакалов⁴*

^{1, 3, 3, 4} Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия.

✉ ¹ kmv-d@list.ru.

✉ ² bogachev-va@yandex.ru.

✉ ³ zadorniy91@mail.ru.

✉ ⁴ Maxim_bmw@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Предложен оригинальный подход к исследованию функционирования связующего и преобразующего звена мультимодальной транспортно-логистической системы, реализуемого железнодорожными грузоперевозками. Методологическую основу исследований составляют классические принципы эгалитаризма в теории благосостояния, позволяющие на основе оценки транспортно-технологической инфраструктуры полигона и тарифных ставок строить математические модели, являющиеся экономически обоснованными, клиентоориентированными и востребованными в управлении процессами грузоперевозок.

В среде системы аналитических вычислений разработан алгоритм решения многокритериальной и многоэкстремальной задачи целочисленного линейного программирования

с набором стоимостных целевых функций. Вычислительный эксперимент используется в качестве направляющего эвристического инструмента при нахождении оптимального уровня организации и экономической эффективности процесса грузоперевозок. С помощью критерия Парето найдены оптимальные сочетания распределений числа отправительских маршрутов по станциям погрузки и относящихся к ним планов перевозок в адрес станций перегрузки. Найденные значения стоимостных показателей предоставляют участникам перевозочного процесса возможность выбора конкурентоспособных вариантов в схемах перевозок, использующих малые припортовые станции перегрузки Азово-Черноморского бассейна.

Ключевые слова: мультимодальные грузовые перевозки, стоимостные показатели, оптимизация, критерий Парето, «ступени» в «оптимизационной лестнице», «области влияния» станций погрузки, припортовые станции перегрузки.

Для цитирования: Колесников М. В., Богачев В. А., Задоружный В. М., Бакалов М. В. Анализ конкурентоспособности малых портов Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных перевозках: технологические аспекты, оптимизационная задача транспортного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-7>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

При изучении функционирования железнодорожного транспорта, представляющего собой связующее и преобразующее звено в логистической цепи мультимодальных грузоперевозок, актуальным и целесообразным являются развитие существующих и разработка новых подходов к оптимизации транспортно-логистических процессов с целью повышения их эффективности и экономии ресурсов.

В общем, оптимизация в транспортных задачах – это процесс поиска наилучшего решения для перевозки грузов или пассажиров на транспорте [1].

Один из методов решения оптимизационных задач, относящихся к железнодорожному транспорту, – оптимизация маршрутов и графиков движения поездов [2–5]. Это может включать изменение расписания движения поездов для увеличения количества грузовых и пассажирских поездов в пиковые часы, а также более равномерное распределение нагрузки. Указанные меры позволяют сократить время простоя поездов на станциях, снизить затраты на их эксплуатацию.

Ещё один метод решения указанных задач – оптимизация весовых характеристик поездов [6].

Интеграция информационных технологий и цифровых систем позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожного транспорта, снизить затраты на его эксплуатацию и обслуживание, а также улучшить качество обслуживания грузовых клиентов [7]. Кроме того, должны учитываться экологические аспекты грузоперевозок [8].

На основе обзора работ, посвящённых анализу рынка зерновых перевозок, отметим, что значительное внимание уделяется анализу инфраструктуры и логистики, включая проблемы доступности, эффективности и конкурентоспособности транспортной инфраструктуры [9].

Также в литературе можно найти исследования, посвящённые отдельным аспектам рынка зерновых перевозок. Например, некоторые исследования анализируют влияние изменений климата на зерновые перевозки [10], включая изменение транспортных маршрутов и увеличение затрат на транспортировку зерна. Другие исследования фокусируются на анализе изменений тарифов на перевозку зерна, включая влияние изменения спроса и предложения на цены [11].

В целом, прогнозирование тарифов при эксплуатации грузовых вагонов является важным инструментом, используемым железнодорожными компаниями и их клиентами, при управлении транспортными расходами и эффективном планировании своей деятельности [12; 13].

В ряде исследований анализируются технологические аспекты зерновых перевозок, включающие в себя разработку новых технологий и инновационных решений для улучшения эффективности перевозок и снижения затрат [14; 15].

Цель исследования – разработка новых подходов в оптимизации транспортно-логистических процессов для повышения их эффективности и экономии ресурсов.

Методологическую основу исследований составляют классические принципы эгалитаризма в теории благосостояния, позволяющие на основе оценки транспортно-технологической инфраструктуры полигона и тарифных ставок строить математические модели, являющиеся экономически обоснованными, клиентоориентированными и востребованными в управлении процессами грузоперевозок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ рынка зерновых перевозок

Рынок зерновых грузоперевозок играет весьма значимую роль в мировой экономике. Последние годы экспорт зерна из Российской Федерации характеризуется существенным ростом (хотя и подверженным колебаниям). При этом почти 90 % зерна проходит через морские порты и почти 81 % – через порты Азово-Черноморского бассейна (АЧБ). Отметим, что в июле–декабре 2019 г. существенно сократились отгрузки в портах Балтики, а также в таких портах АЧБ, как Кавказ и Тамань. При этом был отмечен рост отгрузки в порту Туапсе (+37 %), в малых портах АЧБ (+24 %), а также в портах Каспия (+27 %). Данные в отношении основных направлений экспорта российского зерна представлены на рис. 1.

В транспортной системе, обеспечивающей мультимодальные перевозки зерна на юге России, выделим следующие узловые составляющие: глубоководные порты: Новороссийск, Тамань и Туапсе (позволяющие принимать суда типоразмера Handysize, Suezmax, Rapamax); малые порты Азовского моря; речные порты Волги и Дона.



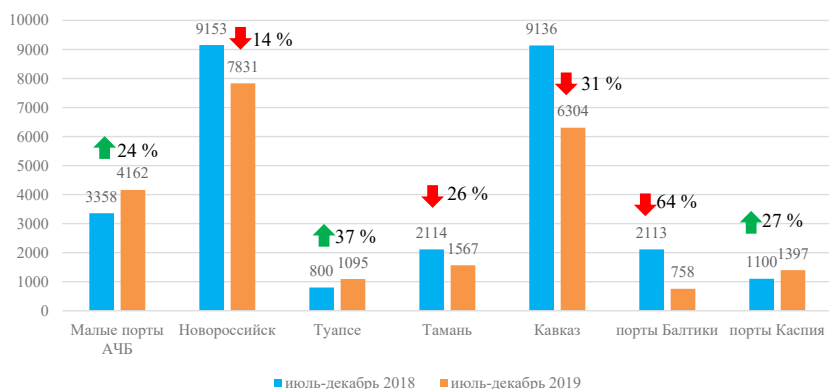


Рис. 1. Основные направления экспорта зерновых грузов. Источник: данные Русагротранс [rusagrotrans.ru/upload/Русагротранс ГЗА 2020.pdf. Доступ 15.01.2023].

2. Постановка задачи и математическая модель преобразующего звена логистической системы

В общую методологическую основу исследований положены эгалитарные принципы теории благосостояния [16]. К решению транспортно-логистических задач мы подходим с позиции одного из основных правил эгалитаризма – принципа единогласия в отношении всех рассматриваемых участников перевозочного процесса (следуя терминологии [16], именуем их агентами). Для мульти-модальных систем грузоперевозок координация действий кооперированных агентов, а также уровень взаимного делового доверия имеют особое значение. Поэтому в каждом звене логистической системы реализация интересов любого агента не должна происходить путём прямого или косвенного ущемления интересов других агентов.

Разработанная методика оптимизационного моделирования процесса грузоперевозок на транспортном полигоне не имеет непосредственного отношения к теории игр (как известно, эта теория математических моделей посвящена нахождению оптимальных решений в условиях конфликтов [17]). Мы не рассматриваем стратегий игроков, а их взаимоотношения не представляются антагонистическими, поскольку инструментом оптимизации распределений грузопотоков, так или иначе, является критерий Парето.

Перейдём к постановке задачи, в которой рассматривается ключевое преобразующее звено мультимодальной логистической системы, представленное железнодорожными грузоперевозками. Имеются m станций погрузки и n припортовых станций перегрузки. На каждой станции погрузки формируются

отправительские маршруты с некоторым грузом. При этом цена груза на станциях разная. Станции перегрузки таковы, что n_1 из них относятся к глубоководным портам, а n_2 – к малым портам ($n_1 + n_2 = n$). В отношении станций погрузки понадобится выполнить математические и организационные построения.

Пусть B – заданное целое положительное число. Введём множество D , элементы которого представляют собой всевозможные упорядоченные наборы $(a_i)_{i=1}^m$, где a_i – целые неотрицательные числа, удовлетворяющие условию:

$$\sum_{i=1}^m a_i = B. \quad (1)$$

Множество D является подмножеством гиперплоскости, задаваемой в пространстве R^m равенством (1), точки которого имеют неотрицательные целочисленные координаты. С точки зрения комбинаторики каждый элемент множества D можно представить, как размещение B неразличимых между собой предметов по m ячейкам. В силу известной формулы [18] получаем, что число элементов D равно:

$$C_{B+m-1}^{m-1} = \frac{(B+m-1)!}{B!(m-1)!}. \quad (2)$$

Из правой части равенства (2) видно, как быстро растут значения C_{B+m-1}^{m-1} с увеличением значений каждого из параметров m и B .

Вернёмся к представленному железнодорожными грузоперевозками звену логистической цепи, предполагая, что следующее (также преобразующее звено) реализуется морским транспортом. В данной ситуации введённые выше упорядоченные наборы

$(a_i)_{i=1}^m \in D$ представляют собой всевозможные варианты распределения по m станциям погрузки числа a_i отправительских маршрутов. Эти маршруты направляются в адрес каких-либо (или какой-либо) из станций перегрузки и в общей сложности обеспечивают формирование полной судовой партии, имеющей заданный объём B .

Далее будем рассматривать множество D , в первую очередь, в связи с совокупностью n_2 станций перегрузки, относящихся к малым портам. Введём два стоимостных показателя, которые характеризуют процесс грузоперевозок непосредственным образом или косвенно и позволяют оценить соответствующую экономическую целесообразность.

Пусть p_i – стоимость груза, которым формируется один маршрут, отправляемый с i -й станции погрузки $i = 1, 2, \dots, m$. Для каждого распределения $(a_i)_{i=1}^m \in D$ числа маршрутов по m станциям погрузки положим:

$$P = \sum_{i=1}^m p_i a_i. \quad (3)$$

Значения целевой функции P представляют собой стоимость всего груза, который при распределении $(a_i)_{i=1}^m$ отправительских маршрутов по станциям погрузки будет перевезён в адрес какой-либо станции (или каких-либо станций) перегрузки. Введение показателя P обусловлено тем, что цена груза, находящегося на разных станциях погрузки, разная. Целевой функцией (3) представлен «внешний» (по отношению к бизнес-процессу грузоперевозок) коммерческий показатель, посредством которого логистическое содержание задачи транспортного типа развивается, в первую очередь, в отношении клиента.

Введём теперь набор показателей, предназначенных для того, чтобы, руководствуясь какими-либо соображениями, выделять те или иные из рассматриваемых станций перегрузки. Эти показатели являются аналогами целевой функции в классической транспортной задаче и имеют вид:

$$C_j = \sum_{i=1}^m c_{ij} a_i. \quad (4)$$

Здесь c_{ij} – стоимость перевозки одного отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки ($i = 1, 2, \dots, m$) и j -й станцией перегрузки в мультимодальной транспортно-логистической цепи ($j = 1, 2, \dots, n$).

Задачей настоящих исследований является построение (в рамках указанных показателей) оптимизационной модели преобразующего звена логистической системы, а также разработка алгоритма решения соответствующей многоцелевой и многоэкстремальной задачи. Модель имеет комплексный характер и представлена взаимосвязанными «внешней» и «внутренней» частями. «Внешней» части модели соответствует оптимизационная задача нахождения распределений $(a_i)_{i=1}^m$ отправительских маршрутов по станциям погрузки, при которых достигается минимума целевая функция (3). «Внутренней» части модели соответствует оптимизационная задача (проистекающая из предыдущей), в которой для каждого распределения $(a_i)_{i=1}^m$ (варируемого во «внешней» части модели) находятся планы перевозок, обеспечивающие минимальное значение суммарной стоимости перевозок (с целевыми функциями (4)) в адрес n_2 станций перегрузки (напомним, что рассматриваемые в совокупности n_2 станции перегрузки образуют мультимодальный транспортный узел с малыми портами). В основе многоцелевой оптимизации лежит критерий Парето, посредством различных форм которого учитываются интересы рассматриваемых агентов.

В соответствии со сказанным введём в рассмотрение планы перевозок (x_{ij}) , где x_{ij} – числа маршрутов, отправляемых с i -й станций погрузки в адрес j -й станции перегрузки, которые должны удовлетворять равенствам:

$$\sum_{j=1}^{n_2} x_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

Напомним, что числа a_i удовлетворяют условию (1).

3. Актуальность проекта приложения разработанной методики и его характеристики

В качестве объекта приложения разработанной методики рассматривается транспортно-технологическая система (ТТС) полигона Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД), примыкающая к глубоководным портам на побережье Чёрного моря и малым портам в Таганрогском заливе. Вследствие интенсивной эксплуатации железнодорожных и автомобильных подходов



Таблица 1

Стоимостные характеристики грузопотока зерновых [выполнено авторами]

№	Станции погрузки	Цена зерна на станциях погрузки, млн руб./марш	Стоимость перевозки, млн руб./марш					
			Тмн 1	Нврс 2	Тп 3	Ек 4	Тг 5	Аз 6
1	Тм 1	46,20	1,39	1,28	1,39	1,28	1,60	1,44
2	Ап 2	43,84	2,45	2,37	2,04	2,66	2,45	2,37
3	Зр 3	45,12	2,05	1,98	2,12	1,44	1,23	1,05
4	Сл 4	49,60	2,05	1,89	1,97	1,74	1,55	1,39
5	Тц 5	43,84	2,57	2,45	2,56	1,89	1,74	1,60
6	Рм 6	45,12	2,45	2,37	2,36	2,12	1,89	1,82

к глубоководным портам представляется весьма актуальной разработка альтернативных вариантов для преобразующих звеньев логистических цепей, которые в рассматриваемых условиях могут оказаться конкурентоспособными.

Для численной реализации построенной в статье оптимизационной модели будем исходить из следующих предположений:

- станциями погрузки зерновых являются Тимашевская (1), Аполлонская (2), Зерноград (3), Сальск (4), Тацинская (5) и Ремонтная (6); припортовыми станциями – Тамань (1), Новороссийск (2), Туапсе (3), Ейск (4), Таганрог (5) и Азов (6);
- маршрутный поезд сформирован в среднем из 50 вагонов грузоподъемностью 64 т;
- в глубоководные порты круглогодично могут заходить грузовые суда (типа Panamax) дедвейтом до 80 000 тонн.

Таким образом, для полной загрузки одной судовой партии требуется ровно $B = 25$ маршрутов.

Отметим, что политика допустимого дедвейта может изменяться со временем и в зависимости от многих факторов (глубина портов и их состояние, типы судов, правительственные нормы и указания регуляторных органов). Учитывая местоположение порта Азов, соответствующую железнодорожную инфраструктуру, а также вопросы рациональности технологий подвода поездов, предполагаем, что в рассматриваемой ситуации в указанный адрес может следовать (со всех указанных станций погрузки в совокупности) не более четырех маршрутов. Это ограничение соответствует тому, что в порт Азов могут заходить морские суда дедвейтом до семи тыс. тонн (таким образом, одно судно практически заполняется двумя отправительскими маршрутами).

Численные данные, позволяющие выполнить соответствующие расчёты оптимизационной модели грузоперевозок, приведены в табл. 1.

4. Предварительные результаты

Для программной реализации разработанного в статье оптимизационного алгоритма в логистическом моделировании процесса грузоперевозок и выполнения вычислительных процедур мы обращаемся к среде *Maxima (Free Ware)*. В данном подразделе приведём результаты соответствующих математических экспериментов, которые носят пробный характер. Исходя из соображений сбалансированности распределений числа маршрутов по станциям погрузки, а также принимая во внимание объём судовой партии (см. подраздел 3), здесь и далее предполагаем, что на каждой станции погрузки может быть сформировано не более чем десять маршрутов с зерном.

Как уже сказано, объектом приложения разработанной методики является ТТС полигона СКЖД, который включает припортовые станции Ейск, Таганрог и Азов (рассматриваемые в данном исследовании в совокупности). Введём суммарный стоимостный показатель:

$$S = P + C, \quad (6)$$

где $C = C_4 + C_5 + C_6$ (см. (4)).

Начнём с минимизации значений показателя S , наблюдая также изменения, которые происходят с другими показателями: P , C_4 , C_5 , C_6 и C . В табл. 2 приведены восемь распределений числа маршрутов по станциям погрузки, соответствующие им планы перевозок в адрес указанных трёх станций погрузки, а также значения рассматриваемых показателей. Мы остановили процесс вычислений после 40-й итерации, руководствуясь

Таблица 2

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей
P, C_p, C_s, C_o, C и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C _i	C	S
		Тм 1	Ап 2	Зр 3	Сл 4	Тц 5	Рм 6				
1	Всего	0	0	0	5	10	10	1137,6		43,41	1181,01
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	0	4	0	0		5,56		
2	Всего	0	0	1	4	10	10	1133,12		43,07	1176,19
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	1	3	0	0		5,22		
3	Всего	0	0	2	3	10	10	1128,64		42,73	1171,37
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	2	2	0	0		4,88		
...
15	Всего	0	3	9	0	10	4	1112,64		40,21	1152,85
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	2	5	0	10	4		36,01		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
16	Всего	0	2	10	0	10	3	1112,64		39,75	1152,39
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	0	8	0	10	3		32,91		
	Аз 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
...
38	Всего	0	8	7	0	10	0	1104,96		44,89	1149,85
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	8	3	0	10	0		40,69		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
39	Всего	0	9	4	0	10	0	1103,68		46,11	1149,79
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	9	0	0	10	0		41,91		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
40	Всего	0	10	5	0	10	0	1102,4		47,33	1149,73
	Ек 4	0	0	0	0	0	0		0		
	Тг 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

несколькими соображениями. Главная причина остановки вычислений является позитивной и заключается в том, что достигнуто минимальное значение стоимости *P* всего перевозимого зерна, которое равно 1102,4 млн руб. (такой вывод можно сделать непосредственно из числовых данных, содержащихся в табл. 1). При наложенных ограничениях на объёмы зерна, вывозимого со станций погрузки, обеспечивающими указанное значение станциями являются Аполлонская, Тацинская и Зерноград (отметим, что вместо станции Зерноград в указанном качестве может выступать станция Ремонтная). Итак, (см. № 40 в табл. 2), на станции

Аполлонская и Тацинская приходится по десять маршрутов, а на станцию Зерноград – пять маршрутов.

Для 40-й итерации значение суммарного стоимостного показателя *S* оказалось равным 1149,73 млн руб. В процессе минимизации этого показателя стоимость перевозки *C* возросла более чем на 9 % (отметим, что соответствующие изменения не были монотонными) и достигла значения 47,73 млн руб. Полученное значение показателя *S* представляет интерес, в первую очередь, для клиента. Величина показателя *C* (как с точки зрения увеличения, так и уменьшения стоимости перевозки) представляет интерес также для



Таблица 3

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей P, C_p, C_s, C_6, C и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C_i	C	S
		Тм 1	Ап 2	Зр 3	Сл 4	Тц 5	Рм 6				
1	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,35	1153,75
	Тг 5	0	10	0	0	10	5		51,35		
	Аз 6	0	0	0	0	0	0		0		
2	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,28	1153,68
	Тг 5	0	10	0	0	10	4		49,46		
	Аз 6	0	0	0	0	0	1		1,82		
3	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,21	1153,61
	Тг 5	0	10	0	0	10	3		47,57		
	Аз 6	0	0	0	0	0	2		3,64		

19	Всего	0	10	1	0	10	4				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	50,09	1152,49
	Тг 5	0	10	0	0	7	4		44,24		
	Аз 6	0	0	1	0	3	0		5,85		
20	Всего	0	10	2	0	10	3				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	39,75	1152,43
	Тг 5	0	10	2	0	10	3				
	Аз 6	0	0	0	0	0	0				

60	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,41	1149,81
	Тг 5	0	10	3	0	8	0		42,11		
	Аз 6	0	0	2	0	2	0		5,3		
61	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,37	1149,77
	Тг 5	0	10	2	0	9	0		42,62		
	Аз 6	0	0	3	0	1	0		4,75		
62	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,33	1149,73
	Тг 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

владельца инфраструктуры и перевозчика (например, если исходить из соображений конкурентоспособности железнодорожных перевозок по отношению к автомобильным). Отметим, что во всех итерациях станция перегрузки Ейск оказалась лишённой поступающих в её адрес маршрутов, что также допускает различную интерпретацию в отношении агентов.

С целью получения предварительных результатов рассмотрим ещё процесс минимизации значений стоимостного показателя C , предполагая, что при этом значения показателя P не меняются и остаются равными минимальному значению 1102,4 млн руб. (Отметим, что можно было минимизировать

значения показателя S). Соответствующие результаты приведены в табл. 3.

Получены те же значения, что и в предыдущем эксперименте (ср. последние строки в табл. 2 и 3). Таким образом, для агентов, чьи интересы сосредоточены, в первую очередь, на минимизации суммарного стоимостного показателя S , приведённые результаты (в рамках поставленных ограничений), по-видимому, являются не улучшаемыми.

5. Вспомогательные результаты

Другой причиной остановки процесса получения предварительных результатов является большой объём вычислений, выполняемых при решении рассматриваемых опти-

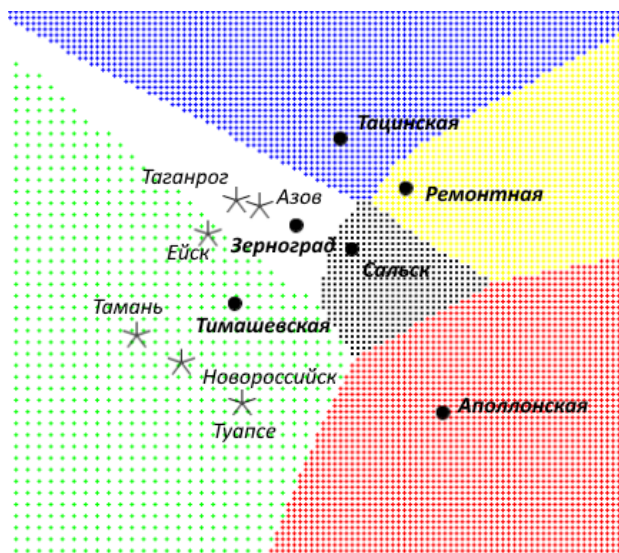


Рис. 2. Картина территориального рынка перевозок зерна [выполнено авторами].

мизационных задач. Из формулы (5) следует, что число допустимых планов перевозок (x_{ij}) в рассматриваемом проекте оценивается снизу числом:

$$C_{B+m-1}^{m-1} \cdot C_{B+n_1-1}^{n_1-1} = \frac{30! \cdot 27!}{(25!)^2 \cdot 5! \cdot 2!} = 50019606. \quad (7)$$

Чтобы найти дополнительные и являющиеся обоснованными ограничения на множества допустимых планов перевозок, обратимся к разработанной ранее авторами геометрической евклидовой модели (ГЕМ) территориального олигополистического рынка грузоперевозок, создаваемого станциями погрузки. Позволяющий построить указанную модель метод экономико-географического разграничения областей влияния станций погрузки подробно изложен в [19–21]. Здесь приводятся лишь соответствующие результаты, которые получены на основе (найденных с помощью метода наименьших квадратов) выражений зависимости стоимости c грузоперевозок для рассматриваемых станций погрузки (см. табл. 4).

В данном случае линиями, разграничивающими «области влияния» станций погрузки в дуополистических ситуациях, являются ветви гипербол (части этих ветвей изображены системой аналитических вычислений Maxima на рис. 2). В «область влияния» станции Тимашевская (1) попали припортовые станции Тамань, Новороссийск, Туапсе и Ейск, а в «область влияния» станции Зерноград – станции Таганрог и Азов. Таким образом, в «области влияния» остальных

Таблица 4

Выражения зависимости стоимости перевозки [выполнено авторами]

1	Тимашевская	$c = 0,0021 + 0,819$
2	Аполлонская	$c = 0,0021 + 0,912$
3	Зерноград	$c = 0,0021 + 0,830$
4	Сальск	$c = 0,0021 + 0,892$
5	Тацинская	$c = 0,0021 + 0,833$
6	Ремонтная	$c = 0,0021 + 0,959$

четырёх станций погрузки не попала ни одна из рассматриваемых припортовых станций. Поскольку стоимости начально-конечных операций на станциях погрузки попарно различны (см. табл. 4), указанные результаты не следуют из простых географических соображений.

Отметим, что использование в прикладных исследованиях различных по математической природе методов позволяет повысить степень достоверности получаемых результатов. При этом часто удаётся существенно сократить объём вычислительных процедур, выполняемых при решении соответствующих оптимизационных задач. Опираясь на ГЕМ территориального рынка грузоперевозок, наложим на множество допустимых планов перевозок следующие ограничения. Будем предполагать, что в адрес припортовой станции Ейск со всех станций погрузки, кроме Тимашевская (1), может направляться не более трёх маршрутов. Кроме того, с указанной станции погрузки не может направляться более трёх маршрутов в адрес станции Таганрог.



Таблица 5

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей P, C_p, C_s, C_6, C и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C _i	C	S
		Тм1	Ап2	Зр3	Сл4	Тц5	Рм6				
1	Всего	0	10	0	5	0	10				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,83	1188,43
	Тг 5	0	6	0	5	0	10		41,35		
	Аз 6	0	4	0	0	0	0		9,48		
2	Всего	0	10	0	5	0	10				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,75	1188,35
	Тг 5	0	7	0	4	0	10		42,25		
	Аз 6	0	3	0	1	0	0		8,5		
3	Всего	0	10	0	5	0	10				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,67	1188,27
	Тг 5	0	8	0	3	0	10		43,15		
	Аз 6	0	2	0	2	0	0		7,52		
...
52	Всего	0	9	9	0	1	6				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1115,2	0	45,48	1160,68
	Тг 5	0	9	5	0	1	6		41,28		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
53	Всего	0	10	10	0	1	4				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1113,92	0	45,48	1159,4
	Тг 5	0	9	7	0	1	4		39,96		
	Аз 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
...
94	Всего	0	5	10	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,43	1150,23
	Тг 5	0	3	8	0	10	0		34,59		
	Аз 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
95	Всего	0	5	10	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,33	1150,13
	Тг 5	0	4	7	0	10	0		35,81		
	Аз 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
96	Всего	0	5	10	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,23	1150,03
	Тг 5	0	5	6	0	10	0		37,03		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

6. Обсуждение

Перейдём к многокритериальной оптимизации процесса грузоперевозок в адрес станций перегрузки Ейск, Таганрог и Азов, которые рассматриваются в совокупности. Оптимизация будет проводиться на основе эгалитарного подхода в теории благосостояния [16] в рамках введённых в подразделе 2 стоимостных показателей P и C . Инструментом, реализующим принцип единогласия, является критерий Парето.

Каждому распределению числа маршрутов $(a_i)_{i=1}^m \in D$ по m станциям погрузки и каждому относящемуся к нему плану перевозок (x_{ij}) в адрес рассматриваемых станций перегрузки поставим в соответствие вектор

$\{P, C\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным сочетанием распределения числа маршрутов и плана перевозок назовём такое сочетание $(a_i^*)_{i=1}^m$ и (x_{ij}^*) с вектором полезностей $\{P^*, C^*\}$, что не существует сочетания $(a_i)_{i=1}^m$ и (x_{ij}) , координаты вектора полезностей $\{P, C\}$ которого удовлетворяют условию $(P < P^*, C \leq C^*)$ или условию $(P \leq P^* \text{ и } C < C^*)$.

Из выражения сентенциональной связки: $(P < P^* \wedge C \leq C^*) \vee (P \leq P^* \wedge C < C^*)$, (8)

следует, что в процессе оптимизации не происходит потери полезности ни для одного из агентов, заинтересованных в минимизации показателей P и C .

Таблица 6

**Распределения числа маршрутов и значения показателей P , C_i и $P+C_i$
[составлены авторами]**

№	Количество маршрутов, сформированных на станциях погрузки						P	C_i	S
	Тм1	Ап2	Зр3	Сл4	Тц5	Рм6			
1	0	0	0	5	10	10	1137,6	60,45	1198,05
2	0	0	1	4	10	10	1133,12	60,45	1193,57
3	0	0	2	3	10	10	1125,64	60,45	1189,09
...
37	2	10	10	0	2	1	1114,8	55,37	1170,17
38	3	6	9	0	7	0	1114,6	55,31	1169,91
...
48	6	10	3	0	6	0	1114,0	54,41	1168,41
49	7	9	1	0	8	0	1113,8	54,39	1168,19
50	7	10	1	0	7	0	1113,8	54,27	1168,07

В табл. 5 приведены восемь комплектов числовых данных из 96 «ступенек», найденных *Maxima* и составляющих соответствующую «оптимизационную лестницу».

Для оптимального сочетания распределения числа маршрутов по станциям погрузки и плана перевозок оказывается (см. № 96 в табл. 5), что на станции Аполлонская следует сформировать пять маршрутов, а на станциях Черноград и Тацинская – по десять маршрутов. При этом значение показателя S оказывается равным 1150,03 млн руб., то есть практически совпадает с полученным в подразделе 4 значением 1149,73 млн руб.. Однако, значение показателя C оказывается равным 41,23 млн руб., то есть на 6,1 млн руб. меньше, чем в предыдущем случае (разница составляет почти 13 %).

Итак, в оптимальном сочетании с точки зрения клиента показатели не уступают предыдущим, а в отношении перевозчика, владельца транспортной инфраструктуры и операторской компании могут оказаться более предпочтительными.

Для сравнения рассмотрим результаты оптимизации грузоперевозок, выполняемых в адрес глубоководной станции перегрузки Тамань. Здесь используется критерий Парето с показателями P и C_i . В табл. 6 приведены восемь комплектов числовых данных из 50 «ступенек», составляющих соответствующую «оптимизационную лестницу».

Для оптимального распределения числа маршрутов по станциям погрузки (заметим, что оно существенно отличается от распределений, полученных для совокупности малых портов) получились значения равные: $P=1113,8$ млн руб., $C_i=54,27$ млн руб.

и $S=P+C_i=1168,07$ млн руб. В данном случае стоимость перевозки на 13,04 млн руб. больше, чем для перевозок в адрес малых портов (разница составляет почти 32 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан основанный на эгалитарных принципах теории благосостояния подход к изучению функционирования ключевого связующего и преобразующего звена логистической системы, каковым являются грузоперевозки, осуществляемые железнодорожным транспортом. Математическая модель перевозочного процесса, рассматриваемого в рамках набора стоимостных показателей, представляет собой многокритериальную и многоэкстремальную задачу целочисленного линейного программирования. Ввиду особой важности для мультимодальных систем грузоперевозок координации действий кооперированных агентов и уровня их делового доверия реализация интересов любого агента не должна происходить путём ущемления интересов других.

Найдены оптимальные по Парето сочетания распределений числа маршрутов по станциям погрузки и относящихся к ним планов грузоперевозок в адрес станций перегрузки. Соответствующие значения стоимостных показателей предоставляют агентам возможности выбора альтернативных вариантов в схемах перевозок с точки зрения конкурентоспособности малых припортовых станций перегрузки по отношению к глубоководным станциям.

Программная реализация оптимизационного алгоритма функционирования рассматриваемого звена логистической системы



выполнена в среде системы аналитических вычислений. Обращение к вычислительным экспериментам создаёт возможности для целенаправленного оперирования значениями целевых функций и ограничениями в задаче транспортного типа с целью выявления оптимального уровня организации и экономической эффективности перевозочного процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зак Ю. А. Математические модели и алгоритмы построения допустимых и оптимальных маршрутов движения и доставки грузов // Проблемы управления. – 2016. – № 5. – С. 57–70. [Электронный ресурс]: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=pu&paperid=993&option_lang=rus. Доступ 13.01.2023.
2. Бородин А. Ф., Вербов Д. М., Рубцов Д. В., Новиков П. О. Автоматизированная система организации вагонопотоков: современные теория и практика // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 4–17. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47186444> [платный доступ].
3. Баушев А. Н., Сафронов В. С., Осминин А. Т., Садчиков В. А. Алгоритмы оптимизации процесса согласования заявок на перевозки грузов по сети российских железных дорог // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5 (95). – С. 52–66. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49856109>. Доступ 13.01.2023.
4. Осминин А. Т. О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 17–27. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44819081> [платный доступ].
5. Кужель А. Л., Осминин А. Т., Осминин Л. А. Развитие теории и практики разработки графика движения поездов // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 6–13. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17723039> [платный доступ].
6. Кокшаров Ю. А. Эффективность оптимизации нормы состава грузового поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2005. – № 1. – С. 7–11. [Электронный ресурс]: https://izvestiagups.org/assets/pdf/01_2005.pdf [полный текст номера]. Доступ 13.01.2023.
7. Шаров В. А., Тлеуханов А. А. Динамические приоритеты пропуска грузовых поездов в коммерческих целях // Мир транспорта. – 2019. – № 4 (83). – С. 208–217. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-208-217>.
8. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Оценка логистических потоков в зеленых цепях поставок методом DEMATEL // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 4. – С. 81–89. DOI: [10.53914/issn2071-2243_2021_3_162](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_162).
9. Севостьянов А. Л. Проблемы развития транспортной инфраструктуры экспорта зерна // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – № 3. – С. 162–167. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47403407>. Доступ 13.01.2023.
10. Светлов Н. М. Влияние глобального потепления на сельскохозяйственные товарные потоки Европейской России // Московский экономический журнал. – 2018. – № 3. – С. 214–227. DOI: [10.24411/2413-046X-2018-13010](https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-13010).
11. Черепанов И. О. Изыскивая погрузочные ресурсы // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 9. – С. 48–49. [Электронный ресурс]: <https://rucont.ru/efd/784498> [платный доступ].
12. Куренков П. В., Хусаинов Ф. И. Инфраструктура железных дорог России и регулирование вагонных парков // Экономика железных дорог. – 2013. – № 9. – С. 35–48. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211142>. Доступ 13.01.2023.
13. Хусаинов Ф. И. Экономические проблемы управления вагонными парками // Экономика железных дорог. – 2010. – № 11. – С. 63–68. [Электронный ресурс]: https://www.hse.ru/data/2014/02/19/1330667500/14_economicshye2010.pdf. Доступ 13.01.2023.
14. Кужель А. Л. Необходим комплексный подход // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 9. – С. 41–43. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36283660> [платный доступ].
15. Третьяков Г. М., Денисов В. В., Кононов И. И. Повышение эффективности перевозки зерновых грузов железнодорожным транспортом // Наука и образование транспорту. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 80–83. [Электронный ресурс]: <https://csc-knu.github.io/tpr/books/mulen-1991.pdf>. Доступ 13.01.2023.
16. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 464 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21808892>. Доступ 13.01.2023.
17. Виноградов И. М. Математическая энциклопедия: Т. 2. – М.: Советская энциклопедия. 1979. – С. 79–80.
18. Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А. Теория вероятностей: Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука, 1967. – 495 с.
19. Chislov, O. N., Zadorozhnyi, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Bakalov, M. V. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems*, 2021, Vol. 16, No. 2, pp. 153–165. DOI: [10.21307/tp-2021-031](https://doi.org/10.21307/tp-2021-031).
20. Chislov, O., Zadorozhnyi, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Egorova, I. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 208, pp. 197–210. DOI: [10.1007/978-3-030-71771-1_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71771-1_13).
21. Задорожний В. М., Малоземов В. Н., Богачев В. А. Экономико-географический метод в моделировании грузопотоков нефтепродуктов на полигоне Северо-Кавказской железной дороги // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 103–112. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43040817>. Доступ 13.01.2023.

Информация об авторах:

Колесников Максим Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры экономики и менеджмента Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, kmv-d@list.ru.

Богачев Виктор Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, bogachev-va@yandex.ru.

Задорожний Вячеслав Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станции и грузовой работы Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, adodorzniy91@mail.ru.

Бакалов Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, Maxim_btmw@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, одобрена после рецензирования 02.06.2023, принята к публикации 05.06.2023.



Типизация проектов развития высокоскоростных железнодорожных магистралей



Сергей ВАКУЛЕНКО



Дмитрий РОМЕНСКИЙ



Кирилл КАЛИНИН

Сергей Петрович Вакуленко¹, Дмитрий Юрьевич Роменский², Кирилл Антонович Калинин³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

✉ ¹ post-iuit@bk.ru.

✉ ² dimeromy@yandex.ru.

✉ ³ kalinin.k.a@mail.ru.

¹ РИНЦ Author ID 284529, SPIN-код: 1039-5188

² ORCID 0000-0002-3693-5508, РИНЦ Author ID 748301, SPIN-код: 6636-1692,

Web of Science Researcher ID AAS-8681-2021

АННОТАЦИЯ

Возникающий запрос на улучшение потребительских параметров железнодорожных пассажирских перевозок приводит к необходимости сооружения специализированной железнодорожной инфраструктуры для пропускки пассажирских поездов со скоростями, на отдельных участках превышающими 250 км/ч. Высокая капиталоемкость проектов развития специализированной инфраструктуры накладывает значительные ограничения на сферу их применения и финансовой обоснованности. Географически детерминированное расположение городских агломераций в европейских и азиатских странах привело к образованию множества подходов к трассировке линий для высокоскоростных пассажирских перевозок.

Разрабатываемые в различных странах проекты развития специализированных высокоскоростных железнодорожных магистралей отличаются по своим техническим, технологическим и эксплуатационным характеристикам. Применение многообразных подходов привело к различной эффективности сформированного пассажирского сообщения, выраженной в спросе пассажиров на перевозку.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, пассажирские перевозки, скоростное движение, высокоскоростное движение, специализированная пассажирская магистраль.

В статье по итогам структурного анализа существующих проектов высокоскоростных перевозок выявлены общие закономерности их развития. По количеству возникающих эксплуатационных задач при пропуске поездов этапы развития сообщения были разделены на линейный, древовидный и сетевой. Так при переходе от линейной структуры высокоскоростной железнодорожной магистрали возникает дополнительная задача отклонения поездов от магистрального участка, а при переходе на сетевой уровень могут возникать параллельные линии между городскими агломерациями.

Для обобщения опыта эксплуатации высокоскоростных систем в мире в статье описан разработанный метод, позволяющий сравнивать различные проекты организации высокоскоростного сообщения между собой. Сравнение производится по основным характеристикам сообщения: времени в пути между раздельными пунктами на линии, обеспечиваемой скорости сообщения, общей протяженности линии. Выявление закономерностей, заложенных в различных проектах развития высокоскоростного сообщения, позволяет сопоставить технологические параметры этих линий, выявить сферу их рационального применения и зоны конкуренции с другими видами магистрального транспорта.

Для цитирования: Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Типизация проектов развития высокоскоростных железнодорожных магистралей // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-8>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожные магистрали, специализированные для скоростных перевозок пассажиров, отличаются по своим эксплуатационным характеристикам от прочих видов железнодорожных перевозок [1; 2]. Для осуществления скоростного сообщения требуется сооружение новой инфраструктуры, отличающейся повышенным уровнем требований к профилю и конструкции верхнего строения пути, на котором пассажирские поезда смогут развивать маршрутную скорость сообщения между основными пунктами назначения выше 180 км/ч, что соответствует представлениям о современной пассажирской высокоскоростной, межрегиональной транспортной системе. Существующая инфраструктура не позволяет осуществлять пропуск пассажирских поездов в скоростном или высокоскоростном режиме из-за наличия инфраструктурных ограничений, таких как кривые малых радиусов. Мировая практика свидетельствует о следующих принципиальных способах организации высокоскоростного сообщения и его взаимодействия с существующей сетью железнодорожных перевозок:

- обособление сооружаемой инфраструктуры и образуемых маршрутов скоростных или высокоскоростных перевозок от остальной сети железных дорог по причине необходимости физической изоляции железнодорожных линий, которые обладают различной допустимой осевой нагрузкой и различной шириной колеи, а также линий с различной принадлежностью инфраструктуры [3]. Примеры процесса обособления сети высокоскоростных линий от прочих железнодорожных участков можно наблюдать в Японии и Саудовской Аравии [4];

- создание выделенной инфраструктуры скоростных пассажирских перевозок с наличием съездов на существующую не скоростную железнодорожную инфраструктуру, при последовательной модернизации этих линий [5; 6];

- включение вновь создаваемых участков скоростных и высокоскоростных пассажирских перевозок в единую маршрутную сеть с существующими линиями при обеспечении возможности съездов высокоскоростного подвижного состава на

участки, не предназначенные для скоростного движения. Примером реализации таких решений являются сети Франции и Германии.

Во всех случаях создание концепций и планов формирования сети маршрутов высокоскоростных перевозок основывается на топологии и опыте функционирования имеющейся магистральной сети. Как следствие, различаются масштабы и объёмы инвестиций в создание и совершенствование высокоскоростной железнодорожной инфраструктуры [7].

При развитии железнодорожной инфраструктуры основных грузо- и пассажиронапряжённых железнодорожных магистралей в России возник вопрос специализации ходов с выделением специализированной инфраструктуры для скоростного пропуска пассажирских поездов¹ [8]. Формирование маршрутной сети обращения пассажирских поездов в дальнем сообщении требует непрерывного совершенствования методологических подходов и технических средств обеспечения движения, а конечной целью формирования каркаса высокоскоростных железных дорог является удовлетворение спроса на межрегиональные перевозки пассажиров, с обеспечением уровня качества, позволяющего эффективно конкурировать с прочими видами магистрального транспорта [9; 10].

Анализ проектов развития специализированной пассажирской инфраструктуры в мире позволяет, как нами уже отмечалось в более ранних публикациях, выявить определённую закономерность этапного развития высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСЖМ) от единичных реконструированных участков до разветвлённой сети, охватывающей все основные агломерации, генерирующие пассажиропоток [3].

Целью данной статьи, отражающей развитие исследования типизации высокоскоростных железных дорог, является уточнение ранее выявленных этапов применительно к реализации проектов разви-

¹ Вакуленко С. П., Куликова Е. Б., Мадяр О. Н. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте. Организация перевозок пассажиров в крупных транспортных узлах при назначении дополнительных остановок пассажирским поездам: Учебное пособие / Под ред. С. П. Вакуленко. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – 148 с. ISBN 978-5-7876-0395-8.

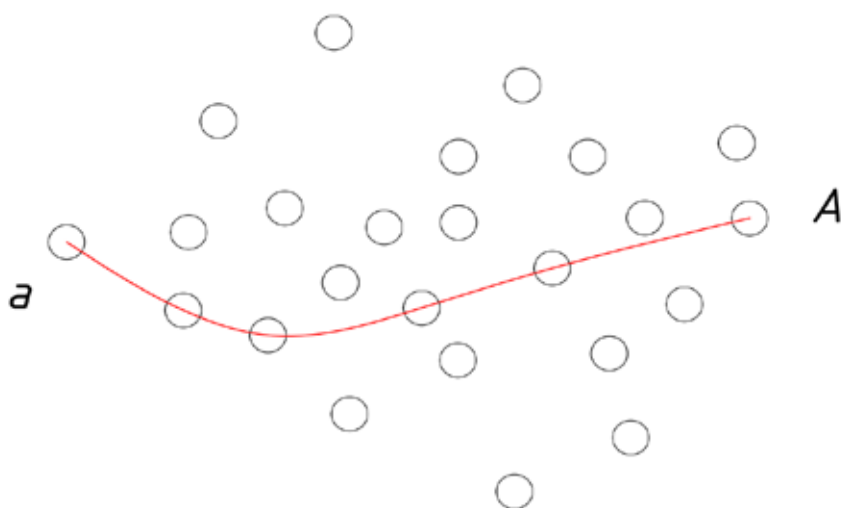


Рис. 1. Линейная структура развития ВСЖМ [3], выполнено авторами.

тия и дальнейшая разработка метода их сравнения с выделением основных характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим этапы эволюционного развития ВСЖМ более подробно.

В качестве первого этапа развития ВСЖМ классифицируется этап *развития линейной инфраструктуры* [3]. На этом этапе происходит выделение направления или участка с наибольшим перспективным спросом на скоростные и высокоскоростные перевозки, происходит сооружение выделенного магистрального участка ВСЖМ или значительная модернизация существующей инфраструктуры. Этот участок, как правило, решает задачу высокоскоростной связанности столицы страны, крупнейшего мегаполиса с другой из имеющихся крупных городских агломераций.

Приведём разработанное схематическое изображение линейной топологии ВСЖМ (рис. 1), которая демонстрирует магистральный участок, связывающий начальную (а) и конечную (А) точку, промежуточно проходя через образующее упорядоченное множество определённое количество населённых пунктов. Это требует модернизации путевого развития всех находящихся на маршруте ВСЖМ пассажирских станций, конечных и промежуточных, для обращения высокоскоростных пассажирских поездов в зависимости от интенсивности пассажирской работы и технологических особенностей обслужива-

ния подвижного состава [3], соответствующие целевые схемы разработаны и отечественной научной школой^{2,3} [11].

Такая линейная структура весьма характерна для стадии зарождения сетей ВСЖМ в странах-пионерах высокоскоростного движения – Франции, Японии, также линейную структуру имеют новые линии пассажирской инфраструктуры в Марокко и Турции (рис. 2). После формирования устойчивого спроса на перевозки по сооружённой линейной высокоскоростной инфраструктуре происходит дальнейшее развитие высокоскоростной инфраструктуры.

Второй этап развития ВСЖМ – этап *древовидной топологии инфраструктуры* [3]. Как следует из использованного названия, на этом этапе происходит продление начальной линии, начинается этап строительства ВСЖМ из столицы в другие мегаполисы за пределами начального маршрута, строятся «питающие», фидерные линии, обеспечивающие подвоз пассажиров к линии ВСЖМ [3].

Отличием фидерных участков от магистральных является их меньшая оснащён-

² Пазойский Ю. О., Савельев М. Ю., Сидраков А. А. [и др.]. Железнодорожные пассажирские перевозки (избранные главы): Для студентов специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог» и направлений 23.03.01 «Технология транспортных процессов» 23.03.02 «Менеджмент» / Под ред. Ю. О. Пазойского. – М.: Российский университет транспорта, 2020. – 407 с.

³ Апатцев В. И., Вакуленко С. П., Головнич А. К. [и др.]. Железнодорожные станции и узлы: Учебник. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 856 с. ISBN 978-5-89035-674-1.





Рис. 2. Топология первой ВСЖМ Марокко с обозначением существующих линий нескоростной железной дороги [3], выполнено авторами с использованием геоподосновы из открытого источника – сервис openrailwaymap.

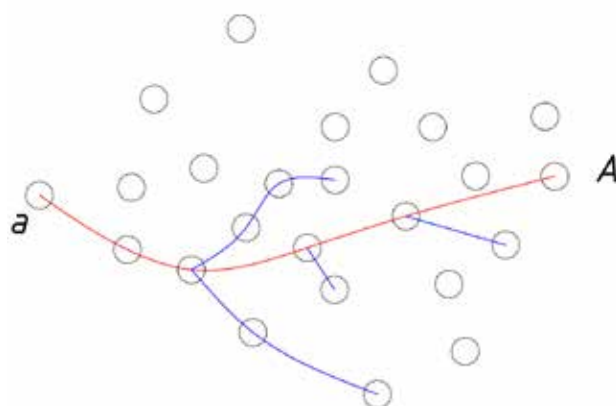


Рис. 3. Древоидная структура развития ВСЖМ [выполнена авторами].

ность, меньшие требования к профилю пути. Они предназначены для перевозок значительно меньшего числа пассажиров по сравнению с объемом перевозок на магистральных линиях. Меньший спрос на перевозку сопровождается меньшими размерами движения по участку и, как следствие, увеличенными интервалами между поездами. При разработке проектов фидерных участков возникает задача минимизации вложений в развитие или реконструкцию железнодорожной инфраструктуры. По этой причине в разряд фидерных линий переводятся существующие участки, реконструируемые для пропуска поездов со скоростями выше 140 км/ч. От-

дельным вопросом для рассмотрения является перспектива применения на таких участках с малоинтенсивным движением однопутных участков по аналогии с техническими решениями, применяемым на скоростных линиях в Испании [12–14].

Схематическое изображение древоидной топологии ВСЖМ представлено на рис. 3, она представляет из себя магистральный участок, аналогичный линейной схеме, а также четыре фидерных участка, которые соединяют отдельные станции множества *a* и агломераций, не вошедших в сферу обслуживания магистрального участка. Маршрутная сеть представлена как маршрутом, соединяющим



Рис. 4. Топология сети ВСЖМ Испании (слева) и Франции (справа) с обозначением существующих линий не скоростной железной дороги [выполнено авторами с использованием геоподосновы из открытого источника – сервис [openrailwaymap](#)].



Рис. 5. Топология сети ВСЖМ Южной Кореи (слева) и Италии (справа) с обозначением существующих линий не скоростной железной дороги [выполнено авторами с использованием геоподосновы из открытого источника – сервис [openrailwaymap](#)].

начальную и конечную точки, так и маршрутами, следующими на ответвления (на фидерные линии).

Разветвлённую сеть ВСЖМ можно наблюдать на железных дорогах стран, которые на протяжении десятилетий совершенствуют и развивают свою сеть высокоскоростных пассажирских перевозок, примерами таких стран могут быть Япония, Франция, Испания, Италия, Турция и Южная Корея (рис. 4–5).

После формирования устойчивого спроса на перевозки по сооружённой древовидной высокоскоростной инфраструктуре происходит дальнейшее развитие высокоскоростной инфраструктуры.

Третий этап развития ВСЖМ – этап сетевой топологии инфраструктуры [3]. Он предпола-

гает строительство линий ВСЖМ, которые могут образовывать параллельные ходы, то есть обеспечивать соединение двух пунктов между собой более чем одним вариантом проследования пассажирского поезда. Строительство идёт в новых, неохваченных высокоскоростным сообщением при древовидном развитии сети регионах, происходит добавление новых маршрутов, фидерных участков и новых магистральных ходов, создающих задачу управления движением на параллельных ходах.

Сетевая топология ВСЖМ приведена на рис. 6. Два магистральных хода образуют параллельное соединение двух пунктов (a и A), а также фидерных линий, составляющих разветвлённую сеть ВСЖМ. Отправление и назначение в такой маршрут-



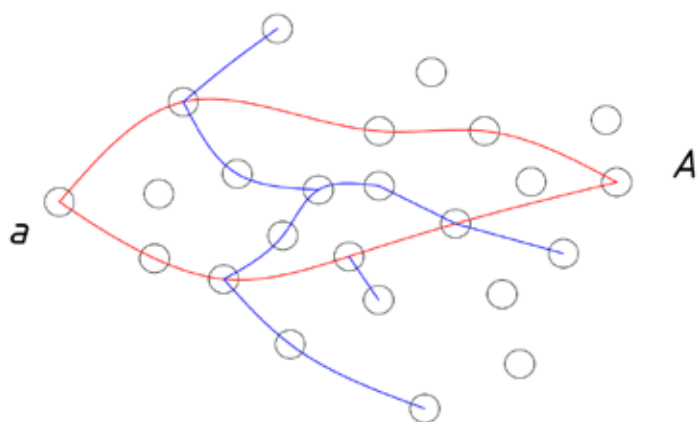


Рис. 6. Сетевая структура развития ВСЖМ [выполнено авторами].



Рис. 7. Топология сети ВСЖМ Германии [выполнено авторами с использованием геоподосновы из открытого источника – сервис openrailwaymap].



Рис. 8. Топология сети ВСЖМ северного Китая (слева) и центрального Китая (справа) [выполнено авторами с использованием геоподосновы из открытого источника – сервис openrailwaymap].

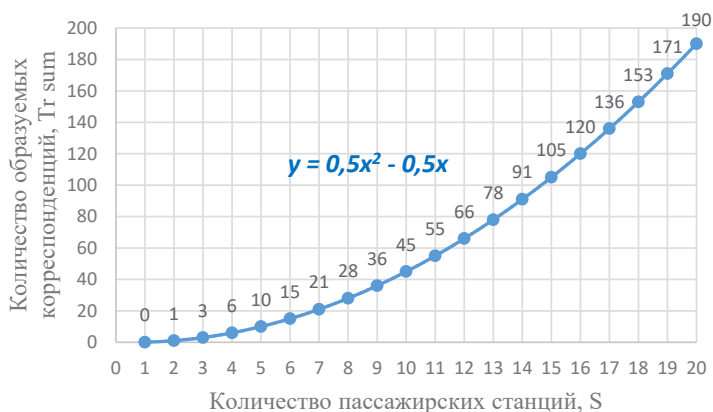


Рис. 9. Количество образуемых пассажирских транспортных корреспонденций, в зависимости от общего числа пассажирских станций на линии ВСЖМ [9], выполнено авторами.

ной сети может происходить из любого узла или опорной пассажирской станции, обеспечивающей устойчивый пассажиропоток из крупнейших агломераций в рамках рассматриваемого транспортного коридора [15; 16].

Подобную структуру развития специализированной пассажирской инфраструктуры можно встретить в Германии и Китае (рис. 7–8).

Для анализа и сравнения сетей ВСЖМ в различных регионах мира важное значение имеет оценка технологической трассировки линий.

Для оценки параметров трассировки ВСЖМ и выявления особенностей проекта на рассматриваемом множестве агломераций, через которые проходит линия ВСЖМ (в дальнейшем множество $a = [1, 2, \dots, A]$), пункты отправления и назначения охарактеризуем координатами x_a и y_a , при этом точка начала отсчёта на местности может быть принята произвольно. Линия ВСЖМ, проходя через города [17] рассматриваемого множества a , образует упорядоченное подмножество $s = [1, 2, \dots, S]$, т. е. $a \supseteq s$. Количество пунктов и пассажирских станций, через которые проходит линия ВСЖМ, влияет на количество образуемых транспортных корреспонденций [18; 19].

В свою очередь увеличение числа корреспонденций Tr_j происходит нелинейно, зависимость общего числа транспортных корреспонденций от количества раздельных пунктов, вовлечённых в сферу обращения высокоскоростных поездов, приведена на рис. 9 и определяется по формуле:

$$Tr_{sum} = 0,5 \cdot S^2 - 0,5 \cdot S. \quad (1)$$

Так как сети ВСЖМ в разных странах отличаются своей протяжённостью, структурой, различиями в технологической трассировке, для целей дальнейшего анализа необходимо произвести нормирование параметров рассматриваемых сетей.

Предлагаемый для этого алгоритм, основанный на методе структурного выравнивания при технологической трассировке специализированной пассажирской инфраструктуры, был нами ранее описан в [3]. Его основные этапы следующие.

На начальном этапе для рассматриваемой сети происходит выявление директивной корреспонденции маршрута, которая представляет собой прямую, соединяющую основной пункт отправления (обозначаемый I) и основной пункт назначения (обозначаемый J). Эту прямую можно описать каноническим уравнением прямой:

$$\frac{x_a - x_{I_1}}{x_A - x_{I_1}} = \frac{y_a - y_{I_1}}{y_A - y_{I_1}}, \quad (2)$$

где x_{I_1} и y_{I_1} – координаты пункта отправления I относительно произвольно принятой точки начала отчёта;

x_A и y_A – соответственно координаты основного пункта назначения J .

«После этого необходимо устранить свободный коэффициент линейного уравнения, для этого необходимо провести смещение начала координатной оси в начальную точку директивной корреспонденции» [3]:

$$\begin{cases} x'_a = x_a - x_{I_1} \\ y'_a = y_a - y_{I_1} \end{cases}. \quad (3)$$



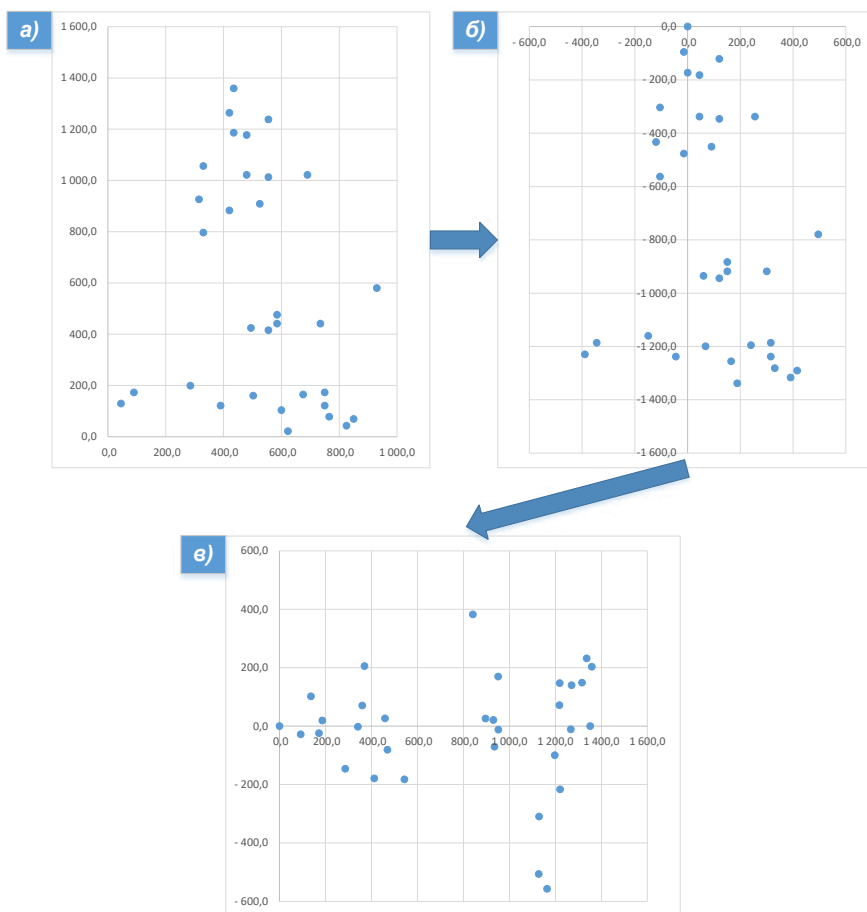


Рис. 10. Выравнивание координат единичной сети ВСЖМ [выполнено авторами].

После корректировки положения всех рассматриваемых точек, характеризующих положение отдельных пунктов на плоскости функция, описывающая определяющую корреспонденцию (2), примет вид:

$$y = \frac{y_A}{x_A} x, \quad (4)$$

где составляющая y_A/x_A характеризует тангенс угла отклонения функции директивной корреспонденции от оси абсцисс, тогда для определения угла наклона в радианах:

$$\alpha = \arctg \frac{y_A}{x_A}. \quad (5)$$

«Для получения итоговых координат точек рассматриваемого массива потенциалообразующих пунктов необходимо устранить угловую составляющую директивной корреспонденции. Для этого, в случае если конечная точка директивной корреспонденции находится в I ($x_A > 0; y_A > 0$) или IV ($x_A > 0; y_A < 0$) четверти координатной плоскости, итоговые координаты точек будут определяться как:

$$\begin{cases} x_a'' = x_a' * (\cos(-\alpha)) - y_a' (\sin(-\alpha)) \\ y_a'' = x_a' (\sin(-\alpha)) + y_a' (\cos(-\alpha)) \end{cases} \quad (6)$$

В случае если конечная точка директивной корреспонденции находится в II ($x_A < 0; y_A > 0$) или III ($x_A < 0; y_A < 0$) четверти координатной плоскости итоговые координаты получаемых точек необходимо инвертировать» [3] (7):

$$\begin{cases} x_a'' = -(x_a' * (\cos(-\alpha)) - y_a' (\sin(-\alpha))) \\ y_a'' = -(x_a' (\sin(-\alpha)) + y_a' (\cos(-\alpha))) \end{cases} \quad (7)$$

Выполнение структурного выравнивания для единичной сети ВСЖМ приведено на рис. 10. На схеме 10а представлено исходное множество точек, отображающих положение отдельных пунктов на карте. На рисунке 10б произведено смещение координат этих точек относительно точки отсчёта (3), а на рис. 10в представлен результат структурного выравнивания множества точек.

При анализе нескольких систем высокоскоростного сообщения (каждая система будет являться элементом множества $f = [1, 2,$

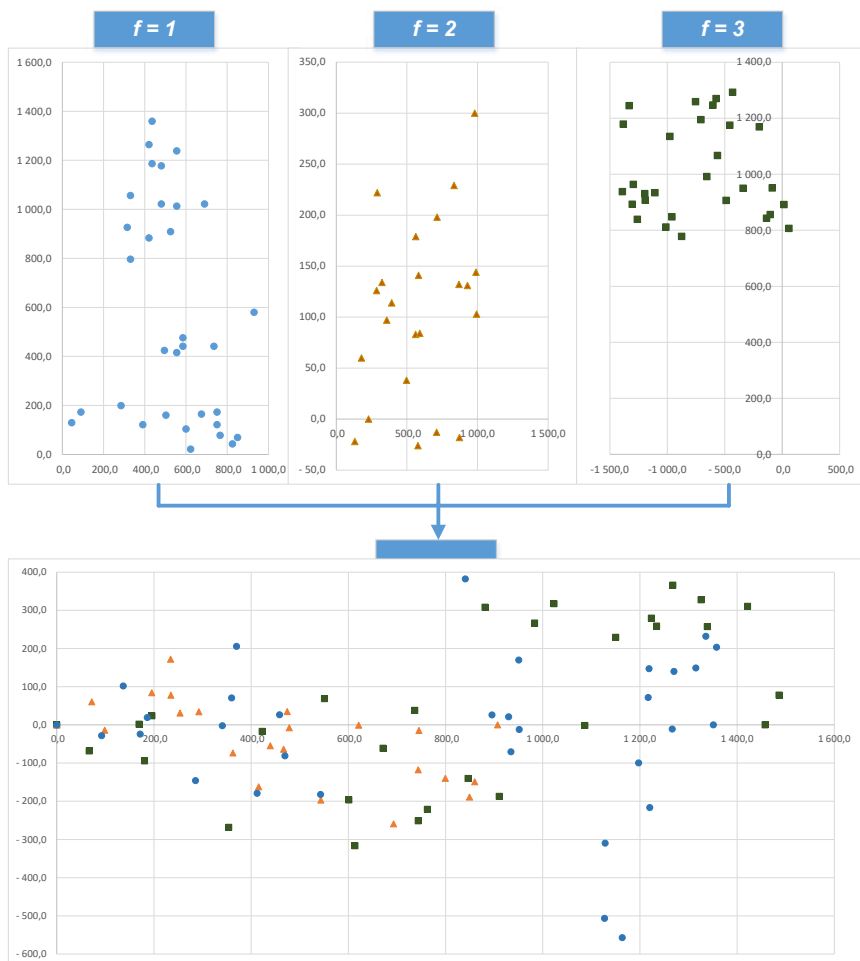


Рис. 11. Выравнивание координат множества сетей ВСЖМ [выполнено авторами].

..., F) координаты положения отдельных пунктов на сети ВСЖМ различных f целесообразно рассматривать как $x_{f,a}$ и $y_{f,a}$. Применение описанного алгоритма для F элементов множества f позволит использовать методы статистического анализа для выявления закономерностей проектов развития ВСЖМ и влияния особенностей трассировки на общую конкурентоспособность высокоскоростного сообщения. Пример использования разработанного метода для $F = 3$ приведён на рис. 11, где представлены три абстрактных множества точек сетей ВСЖМ, $f1, f2, f3$.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Выявление закономерностей, заложенных в различных проектах развития высокоскоростного сообщения, позволит сопоставить технологические параметры этих линий, а также изучить роль ВСЖМ в транс-

портной системе страны, сферу их рационального применения и зоны конкуренции с прочими видами магистрального транспорта. Описанный метод исследования позволяет выявить общие закономерности прохождения участков специализированной пассажирской инфраструктуры через населённые пункты множества a , генерирующие пассажиропоток для магистральных видов транспорта. Полученные значения демонстрируют различия проектов развития высокоскоростного сообщения железнодорожных сетей множества f , направленных на обеспечение устойчивой связи каждой пары пунктов отправления i и назначения j , всех обеспечиваемых корреспонденций Tr_{ij} . На основе полученных результатов можно строить предиктивные модели определения спроса на высокоскоростные железнодорожные перевозки в России.





СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hu, B. [et al]. Statistical Analysis and Predictability of Inter-Urban Highway Traffic Flows: A Case Study in Heilongjiang Province, China. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2020, Vol. 16, pp. 1062–1078. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1720039>.
2. Yang, Z. Cheng, J. Optimization of trip-end networks and ride price for express coach systems in the high-speed rail era. *Promet – Traffic – Traffico*, 2017, Vol. 29, No. 6, pp. 581–592. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v29i6.2271>.
3. Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Типизация структур высокоскоростных железнодорожных магистралей // *Экономика железных дорог*. – 2022. – № 11. – С. 40–50. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49944780>. EDN: GJTPMF [платный доступ].
4. Киселёв И. П. Полвека высокой скорости: к 50-летию открытия первой в мире высокоскоростной железнодорожной магистрали Токио–Осака // *Железнодорожный транспорт*. – 2015. – № 2. – С. 70–77.
5. Киселёв И. П., Китунин А. А. Китайская «Гармония»: опыт локализации высоких технологий железнодорожного транспорта // *Транспорт Российской Федерации*. – 2013. – № 2 (45). – С. 38–41. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19034215>. EDN: QANRFX. Доступ 13.01.2023.
6. Киселёв И. П., Китунин А. А. Высокоскоростной железнодорожный транспорт КНР: от первых скоростных линий к мегапроекту «Евразия» // *Транспорт Российской Федерации*. – 2018. – № 1 (74). – С. 9–14. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32637975>. EDN: YSURGO. Доступ 13.01.2023.
7. Калинин К. А. О комплексном подходе к анализу линий ВСЖМ // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2021. – № 2 (82). – С. 137–147. DOI: [10.46973/0201-727X_2021_2_137](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_2_137).
8. Бородин А. Ф. Проблемы разработки Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» // *Железнодорожный транспорт*. – 2017. – № 8. – С. 34–42. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29967620>. EDN: ZFUNDZ [платный доступ].
9. Середов Е. А. Формирование маршрутной сети пассажирских поездов с учетом предпочтений пассажиров // *Экономика железных дорог*. – 2021. – № 11. – С. 34–43. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47381345>. EDN: GAOOYX. Доступ 13.01.2023.
10. Пазойский Ю. О., Савельев М. Ю., Середов Е. А. Использование методов теории нечётких множеств для освоения пассажиропотока // *Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России: Труды международной научно-практической конференции*. Москва, 22–23 апреля 2021 года / Отв. редактор А. Ф. Бородин, сост. Р. А. Ефимов. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – С. 328–332. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46552816>. EDN: VFOGPF. Доступ 13.01.2023.
11. Сидраков А. А. Организация скоростных пассажирских перевозок в дальнем сообщении: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» / Дис... на соискание учёной степени к. т. н. – М., 2012. – 182 с.
12. Калидова А. Д. Обоснование конфигурации однопутно-двухпутных линий при организации скоростного движения поездов / Дис... на соискание учёной степени к. т. н. – Новосибирск, 2019. – 194 с.
13. Калидова А. Д. Определение условий применения однопутно-двухпутных элементов для скоростной линии // *Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: Материалы международной научно-практической конференции*, Новосибирск, 19–20 октября 2017 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 24–29. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35237003>. EDN: XSWRYT [платный доступ].
14. Карасёв С. В., Калидова А. Д. Моделирование пропускной способности однопутных лимитирующих элементов трассы при организации скоростного движения с использованием существующей инфраструктуры // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2018. – Т. 77. – № 1. – С. 34–43. DOI: [10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43](https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43).
15. Zhang, Q. [et al]. Simultaneous optimization of train timetabling and platforming problems for high-speed multilane railway network. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Vol. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6679008>.
16. Wang, Y., Han, B., Wang, J. A passenger flow routing model for high-speed railway network in different transportation organization modes. *Promet – Traffic – Traffico*, 2018, Vol. 30, No. 6, pp. 671–682. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i6.2733>.
17. Калинин К. А., Роменская М. В. Варианты ввода высокоскоростных железнодорожных магистралей в города, их влияние на работу железнодорожных узлов и развитие агломераций // *Устойчивое развитие территорий / Сборник докладов II-ой Международной научно-практической конференции*, Москва, 20–21 мая 2019 года. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. – С. 196–198. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41253060>. EDN: AHUNJT. Доступ 13.01.2023.
18. Вакуленко С. П., Роменский Д. Ю., Калинин К. А. Метод прогнозирования пассажиропотоков при организации высокоскоростных перевозок // *Транспорт Российской Федерации*. – 2021. – № 1–2 (92–93). – С. 34–39. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46108216>. EDN: NURFGK.
19. Вакуленко С. П., Калинин К. А. Применение гексагонального анализа для определения параметров корреспонденций пассажирских перевозок // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2022. – № 2. – С. 3–10. DOI: [10.36535/0236-1914-2022-02-1](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2022-02-1). ●

Информация об авторах:

Вакуленко Сергей Петрович – кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, post-iiut@bkk.ru.

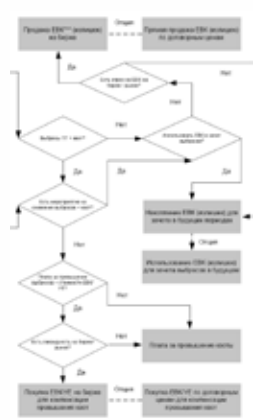
Роменский Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальных систем Российского университета транспорта, Москва, Россия, dimeromu@yandex.ru.

Калинин Кирилл Антонович – ассистент кафедры управления транспортным бизнесом и интеллектуальных систем Российского университета транспорта Москва, Россия, kalinin.k.a@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023, одобрена после рецензирования 17.04. 2023, принята к публикации 21.04.2023.



БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ



УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД

96

Сокращение выбросов: российское законодательство и транснациональное регулирование. Тенденции и выводы.



БЕЗОПАСНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

106

Практические испытания и нормативно-правовая база как взаимосвязанные явления.

ТРАНСПОРТНОЕ ПРАВО

115

Беспилотные автомобили: правовая теория готовит базу для новых норм.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.001.57

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-9>

Развилки углеродного регулирования



Борис ЛЕВИН



Виктор ЦВЕТКОВ



Николай ИСАИН



Андрей ОХОТНИКОВ

**Борис Алексеевич Лёвин¹, Виктор Яковлевич Цветков²,
Николай Владимирович Исаин³, Андрей Леонидович Охотников⁴**

^{1,2}Российский университет транспорта, Москва, Россия.

^{3,4}АО «НИИАС», Москва, Россия.

✉ ² cvj2@mail.ru.

² РИНЦ SPIN-код 3430-2415, AuthorID 140020.

³ РИНЦ SPIN-код 6471-3356, AuthorID 1177738.

⁴ РИНЦ SPIN-код: 9528-4823, AuthorID: 916989.

АННОТАЦИЯ

В мире существует 1800 законов об изменении климата. В последние годы стремительный рост выбросов углерода вызвал глобальное потепление и загрязнение климата, что наносит серьезный вред развитию общества и здоровью человека. Сокращение выбросов углерода привлекает большое внимание. После подписания Киотского протокола и Парижского соглашения многие страны предприняли усилия по сокращению выбросов углерода.

В статье дано описание международных процессов регулирования парниковых выбросов, в том числе регулируемого рынка квот и добровольного рынка сокращения выбросов парниковых газов. Акцент сделан на европейских и рос-

сийских механизмах квотирования. Приведены этапы развития трансграничного углеродного регулирования в ЕС. Отмечено, что в России лидером в применении критериев ESG выступает ОАО «РЖД» как компания, которая последовательно осуществляет переход к реализации принципов устойчивого развития.

Представлены выводы о международных тенденциях развития углеродного регулирования, а также предложены решения для проблемных аспектов нового российского углеродного законодательства. По мнению авторов, целевым сценарием остается переход на новый технологический уклад с реальным снижением углеродного следа.

Ключевые слова: транспорт, устойчивое развитие, экология, углеродный рынок, углеродные выбросы, декарбонизация, климатическая повестка, парниковые газы, выбросы CO₂, ESG.

Для цитирования: Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Исаин Н. В., Охотников А. Л. Развилки углеродного регулирования // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-9>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время термины «принципы устойчивого развития», «ESG-критерии», «углеродный след», «климатические проекты», «квоты», «парниковые газы» или «декарбонизация» широко заявляются средствами массовой информации. Параллельно проводятся различные тематические и отраслевые мероприятия и форумы по этим актуальным темам устойчивого развития. Запускаются новые образовательные программы и курсы, в том числе в высших учебных заведениях и корпоративных научных институтах. Разделы по устойчивому развитию входят во все стратегии и программы развития крупнейших компаний Российской Федерации. Во многом лидером в применении критериев ESG является ОАО «РЖД» как оператор самого экологически чистого вида транспорта с выбросами CO₂, составляющими всего 0,7 % от всех выбросов транспортного сектора России [1]. Холдинг «РЖД» одним из значимых аспектов достижения своих стратегических целей выделяет последовательный переход к реализации принципов устойчивого развития в соответствии с критериями ESG: Environment (ответственное отношение к окружающей среде), Social (высокая социальная ответственность), Governance (высокое качество корпоративного управления).

Целью исследования является анализ нового российского законодательства в области снижения парниковых выбросов и обзор текущего состояния развития процессов устойчивого развития в области декарбонизации. Основными методами исследования являются статистический, сравнительный, качественный и системный анализ.

Статья предлагает описание международных процессов регулирования парниковых выбросов и представляет общие результаты исследования по текущему статусу развития процессов устойчивого развития в области декарбонизации как главного критерия ESG с точки зрения регуляторного воздействия. В статье сосредоточено внимание на развилках углеродного регулирования для стратегического и операционного планирования «зелёной экономики» субъектом выбросов парниковых газов в РФ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Международные процессы

Международные процессы регулирования парниковых выбросов находятся в двух плоскостях: регулируемый рынок квот и добровольный рынок сокращения выбросов парниковых газов.

Мировой оборот регулируемого рынка квот (например, СТК – система торговли квотами) примерно в 150 раз больше добровольного рынка в денежном выражении. Для понимания масштабов данных процессов отметим, что за 2021 год мировой оборот рынка СТК составил около 260 млрд долларов США. Основной целью введения квотирования является снижение выбросов парниковых газов на 55 % к 2030 г. и достижение углеродной нейтральности к 2050 году, что регулируется международными обязательствами стран в рамках Киотского протокола и Парижского соглашения. Выпуск квот в обращение в ряде стран формирует доходную часть бюджетной системы, а вторичный рынок неиспользованных квот – выручку коммерческих организаций.

Квоты в ЕС изначально выдавались бесплатно. При этом лимит бесплатных квот будет стремиться к нулю к 2032–2035 гг. Есть общая постепенная тенденция увеличения их стоимости в СТК при уменьшении физического предложения. Оба этих фактора постепенно повлияли на увеличение средней цены разрешения на выбросы в ЕС до 90 долларов США за 1 тонну парникового газа CO₂-эквивалента. В некоторых странах вместо квотирования используются только штрафы за выбросы, есть и гибридные варианты – квота плюс штраф при её превышении. В любом случае, по различным прогнозам, стоимость квот или штрафов за выбросы стремится к 100 долларам и более за тонну выбросов парниковых газов CO₂-эквивалента.

В мире представлено 25 национальных систем квотирования, что определяет их низкую совместимость в случае введения транснациональных налогов, платежей, сборов или специальных углеродных сертификатов. На практике это означает, например, невозможность использовать углеродную квоту третьей страны или её денежный эквивалент вместо покупки европейского углеродного сертификата. Этот сценарий будет актуальным в случае введения транснациональных сборов за ввоз на рынок ЕС иностранной продукции с большим углеродным следом при её производстве. Список продукции уже известен, с 2025 года возможно расширение перечня импортируемой ЕС продукции, подпадающей под транснациональный сбор.

Также сохраняется проблема двойного счёта в мировом масштабе при зачёте квот разными странами. Например, сейчас со стороны Министерства экономического развития РФ ведутся работы по предоставлению доступа международным верификаторам на рынок РФ, прежде всего со стороны КНР. Это позволит российским



эмитентам регистрировать свои климатические проекты по китайским стандартам. Китайская сторона купит и зачтёт себе выпущенные в РФ единицы сокращения выбросов в результате реализации определенного климатического проекта. В то же время, РФ зачтёт себе сокращение выбросов по этому же климатическому проекту.

В развитие европейской системы квотирования запущен механизм *CBAM* (*Carbon Border Adjustment Mechanism*) – трансграничное углеродное регулирование, разработанное в рамках принятой «Зелёной сделки» (Решение Европейского парламента и Совета об утверждении механизма *CBAM*) [2]. Этот механизм алгоритмизирует взимание углеродного налога в рамках трансграничного углеродного регулирования (далее – ТУР) и официально ориентирован на стимулирование торговых партнеров сокращать эмиссию парниковых газов (ПГ), а также углеродный след в энергоёмкой продукции, поставляемой на экспорт, в первую очередь, в Европу.

Этапы развития трансграничного углеродного регулирования в ЕС на сегодняшний день находятся в следующем состоянии:

1. На период 2023–2025 гг. механизм ТУР нацелен на ежеквартальный сбор данных об объеме «прямого» углеродного следа от производства отдельных видов импортируемой продукции (железа, стали, алюминия, цемента, удобрений, электроэнергии) и не предполагает уплату сборов.

2. К концу 2025 г. Еврокомиссия проведёт оценку системы ТУР и примет решение о расширении сферы применения механизма на другие товары.

С 2026 г. ТУР предполагает обязательную закупку поставщиками сертификатов на выбросы парниковых газов в соответствии с углеродоёмкостью их продукции, где стоимость единицы выбросов будет определяться внутренней еженедельной средней аукционной ценой надбавок в рамках системы торговли выбросами ЕС. При этом в теории импортёры смогут учитывать уплаченную стоимость углерода в рамках национальной системы учёта выбросов во избежание двойного налогообложения.

В целом, исходя из международных тенденций, отметим возможные последствия реализации ТУР для третьих стран:

- в дальнейшем не исключается включение в сферу ТУР продукции нефтепереработки и нефтехимии по истечении переходного периода в 2025 году. Наименее проигравшими окажутся те компании, которые эффективно распорядятся временем, которое остаётся до ввода сбора;

- компаниям следует начать измерять свой углеродный след, отслеживать стоимость углеродных выбросов и их влияние на общие затраты, планировать действия при различных сценариях развития событий;

- необходимо определить сектора, в которых продукция имеет углеродоёмкость выше, чем у основных конкурентов-поставщиков на рынок ЕС, и проанализировать, как снижать углеродный след продукции;

- один из способов ухода от платежей ТУР – переход к экспорту номенклатуры товаров более высоких переделов и уход от экспорта базового сырья и материалов. Другими возможными мерами могут быть перекладывание дополнительных издержек на потребителя (учёт ТУР при ценообразовании, если допустимо) или снижение прочих издержек для компенсации негативного эффекта от трансграничных углеродных платежей.

Тем не менее, целевым сценарием остается переход на новый технологический уклад с реальным снижением углеродного следа.

Добровольный рынок, в отличие от регулируемого государством рынка квот, не является обязательным. Соответственно, выход эмитентов на добровольный рынок может исходить из их личной потребности стать углеродно-нейтральным и/или желанием создавать «зелёную» премиальную продукцию.

В первом случае, к преимуществам статуса углеродно-нейтральной компании можно отнести рейтинговые преференции, льготное финансирование или допуск на ранее закрытый рынок финансирования, в том числе через выпуск «зелёных» облигаций, а также имиджевые истории для публичной компании.

Во втором случае, переход к выпуску «зелёной» продукции может позволить увеличить ее стоимость и конкурентоспособность и в том числе обеспечить выход на новые рынки сбыта, что, точнее, означает отсутствие запретов на прежние поставки в рамках мировой «зелёной» повестки. По сути, выпуск добровольных углеродных единиц (далее, УЕ) в обращение связан с тем, что компания, планирующая нивелировать углеродоёмкость своей продукции, приобретает добровольные УЕ у другой компании, реализовавшей климатический проект (далее – КП), в результате которого выбросы парниковых газов были предотвращены или поглощены. В результате такой сделки компания, вкладывая средства в реализацию другими организациями КП, получает формально нейтрально- или низкоуглеродный товар, так как выделенный при его производстве объём парникового газа был компенсирован поглощением или сокраще-

нием выбросов такого же количества парникового газа в другом проекте.

Общая «зелёная» схема декарбонизации следующая: компания инвестирует в экопроект, например, озеленение территории или строительство газовой котельной вместо угольной, регистрируя проект как климатический по выбранному добровольному стандарту, далее выпускает определённый расчётный объём углеродных единиц, который получает за счёт сокращения выбросов CO₂ [3]. И далее, со своего углеродного счета можно продавать выпущенные единицы сокращения выбросов или соразмерно увеличить стоимость своей, теперь «премиальной», продукции. Климатический проект не обязательно реализовывать в своей компании в рамках основной деятельности. Никто не мешает засадить вырубленные леса в Индонезии или увеличить поглощения парниковых газов за счет лесопосадок в тундре. Особенно это актуально для добывающих отраслей, возможности снизить выбросы CO₂ в которых существенно ниже, чем в прочих отраслях. Например, вынужденный ввод дожимной компрессорной станции может в 10 раз увеличить выбросы CO₂ газодобывающей компании.

В мире существует около 30 добровольных программ сертификации (стандартов) УЕ, среди которых выделяются крупнейшие:

1. Verified Carbon Standard (VCS), США – биржа / внебиржевые площадки (OTC);
2. The Gold Standard (GS), США – OTC;
3. Global Carbon Council (GCC), Катар – OTC;
4. China GHG Voluntary Emission Reduction Program (CCER), КНР – биржа;
5. Clean Development Mechanism (CDM), ООН – OTC.

Стоимость УЕ при их выпуске в обращение по разным стандартам колеблется в диапазоне от 3 до 20 долларов США за 1 тонну CO₂ и не зависит от объёма инвестиций в климатический проект. С точки зрения прямой окупаемости при выпуске и реализации УЕ, с учетом немалых затрат на климатический проект, необходимый объем сокращения выбросов CO₂ должен достигать не менее 200–300 тысяч тонн. При этом в затраты нужно ещё закладывать стоимость регистрации климатического проекта и выпуска УЕ. Для европейских и американских добровольных стандартов стоимость выпуска УЕ может составить 200–250 тысяч долларов США за 1 КП.

К основным слабостям добровольного углеродного рынка стоит отнести неоднородность выпускаемых УЕ (ввиду существенных разли-

чий в регулировании международных стандартов и торговых площадок), недостаточную ликвидность и непрозрачность образования цен на УЕ [4]. Стандарты выпуска УЕ ООН и США запрещают использовать добровольные УЕ в зачёт обязательных квот. В КНР в этом случае чуть больше лояльности – до 5 % от выпущенных УЕ китайская компания может использовать в зачёт квот.

Российская практика

В рамках выполнения международных обязательств РФ планирует снижать выбросы парниковых газов на 1,5–2 % ежегодно вплоть до 2060 года. В отличие от ЕС, в РФ есть большой ресурс поглощения парниковых газов за счёт землепользования и лесного хозяйства. Этот ресурс наша страна хочет использовать в зачёт своих выбросов, частично уменьшив их, что делает наши подходы к декарбонизации схожими с Северной Америкой, где тоже высок поглотительный природный ресурс. Соответственно, в настоящее время Российская Федерация находится в активной стадии формирования национальной нормативно-правовой базы углеродного регулирования (за период с 2021 по 2022 год принято около 30 нормативно-правовых актов), систем независимой верификации, обращения углеродных единиц и единиц выполнения квоты (когда выбросов меньше квоты).

В июне 2021 года в России был принят первый ключевой климатический ФЗ № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов» (далее – ФЗ-296), предполагающий регулирование снижения уровня выбросов парниковых газов, введение «зеленых» сертификатов и климатических проектов [5]. Данный нормативно-правовой акт не предполагает активного использования инструментов обязательного климатического регулирования (в том числе введение углеродного налога или квотирования выбросов) на федеральном уровне. В то же время участие в КП, создание и государственная поддержка которых предусмотрены документом, может быть привлекательным для корпоративного сектора. При этом, в соответствии с законом, участники таких проектов могут передавать углеродные единицы другим юридическим лицам, что закладывает основания для торговли УЕ.

В рамках развития российской системы торговли УЕ 26 сентября 2022 года стартовали первые российские торги на товарных аукционах, проводимых Национальной товарной биржей (НТБ, группа «Московская биржа»). По итогам первого дня были заключены две сделки купли-продажи общим объемом 20 УЕ. Средневзве-



шенная цена продажи составила 1000 рублей за 1 УЕ [6].

Важно отметить, что в случае реализации КП на территории России и верификации его результатов по российскому национальному стандарту, выпущенные УЕ не будут признаны на международном рынке и, соответственно, не смогут быть реализованы на международной бирже. Для выхода на международный рынок для продажи УЕ требуется сертификация по международным стандартам, соответственно, в настоящее время действующим законодательством Российской Федерации не установлена возможность признания УЕ, выпущенных или приобретенных за рубежом. Необходимо также отметить, что с учетом текущей политической ситуации, возможность выхода российских компаний на международные биржи может быть ограничена и усложнена.

В марте 2022 года был принят второй климатический ключевой ФЗ № 34 «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах РФ» (далее – ФЗ-34), согласно которому Сахалинская область станет пилотным регионом, в котором углеродная нейтральность будет достигнута к концу 2025 года [7]. В качестве ключевых задач эксперимента обозначены формирование системы независимой верификации и создание системы обращения углеродных единиц и единиц выполнения квоты (превышение размера квот над выбросами) [8]. Предполагается, что в перспективе эксперимент будет продолжен на территориях иных субъектов Российской Федерации.

Отметим, что первый экспериментальный регион, Сахалинская область, формирует 12,3 млн тонн выбросов CO_2 -эквивалента при поглощениях 11,1 млн. тонн. Чистый нетто-выброс (выбросы минус поглощения) составляет 1,2 млн тонн CO_2 -эквивалента [9]. В рамках эксперимента 70 % нетто-выбросов будет брать на себя субъект (реализация бюджетных проектов по возобновляемой энергетике, газификации, энергосбережению и утилизации отходов). Остальные 30 % распределили по эмитентам, которые формируют в сумме 75 % выбросов. Новые регионы РФ, которые заявили о своем желании участвовать в эксперименте по квотированию, уже имеют отрицательные нетто-выбросы (например, Иркутская область) либо на границе полного поглощения в 1–3 млн тонн CO_2 (Калининградская область, Хабаровский край, Республика Башкортостан, Нижегородская область). Получается, что планы по запуску эксперимента и отра-

ботке методики квотирования касаются, прежде всего, субъектов с небольшими нетто-выбросам. Каждый регион, который будет присоединяться к эксперименту, может иметь свои критерии для определения списка предприятий, участвующих в квотировании. Поэтому устанавливать их для каждого субъекта будет федеральное правительство, просчитывая лучшую модель для выхода субъекта на углеродную нейтральность. Для этого субъект Российской Федерации должен провести инвентаризацию выбросов и поглощения парниковых газов (ПГ), оценить последствия эксперимента для бюджета региона и бизнеса, прописать ожидаемую траекторию снижения выбросов парниковых газов и подходы к распределению квот между региональными регулирующими организациями. Согласно утвержденным «критериям отнесения юридических лиц и ИП к регулируемым организациям от 14.03.22 № 355» с 01.01.2025 г. под регулируемые подпадают предприятия с выбросами ПГ более 50 тыс. тонн CO_2 -эквивалента в год [10]. С 01.01.2025 года регулируемые организации будут обязаны ежегодно формировать и верифицировать Отчет о выбросах ПГ за предыдущий год.

В целом по РФ за 2020 год выбросы ПГ составили 2,1 млрд тонн CO_2 -эквивалента. На поглощение за счёт землепользования и лесного хозяйства пришлось 0,5 млрд тонн CO_2 -эквивалента. Таким образом, нетто-выбросы в России составили 1,6 млрд тонн. Количество субъектов, где выбросы больше поглощения (положительные нетто-выбросы) составляет около 10 регионов. Тем не менее, остальным регионам с отрицательными нетто-выбросами, если субъект Российской Федерации поглощает больше 100 % своих выбросов, нераспространение режима квотирования не гарантируется. Это является вполне логичным и закономерным, так как «хорошие» по нетто-выбросам субъекты являются таковыми в силу своего исторического географического расположения, а не из-за своей целевой инвестиционной региональной политики. И без участия «хороших» субъектов в режиме квотирования достичь углеродной нейтральности в Российской Федерации будет практически невозможно. Соответственно, может потребоваться компенсационный механизм распределения квот на регионы с отрицательными нетто-выбросами.

Одним из способов формального снижения выбросов экспортоориентированными предприятиями рассматривается реструктуризация

портфелей активов, исходя из интенсивности выбросов углекислого газа.

Также в последние годы активно развивается и становится актуальным применение критериев ESG, которые в Российской Федерации реализуются в виде «зелёной таксономии». Данная система была разработана при участии ВЭБ.РФ в качестве методологического центра по финансовым инструментам устойчивого развития и направлена на обеспечение перетока инвестиций из высокоуглеродных отраслей экономики в низкоуглеродные, в том числе за счет предоставления:

- льготного «зелёного финансирования» эко-проектов;
- банковских гарантий для «зелёных» проектов;
- учёт ESG рейтинга эмитента в его рейтинге заемщика.

ВЭБ.РФ с учетом мировой практики (ICMA, CBI, IDFC, Европейский Союз) разработал стандарты «зелёного» финансирования (требования к системе верификации) и систему критериев для «зелёных» проектов, включающую в том числе [11]:

- сокращение выбросов углекислого газа;
- повышение вторичного оборота материалов;
- защиту и восстановление биоразнообразия и природных объектов.

Например, для реализации «зелёного» проекта может предоставляться субсидия из федерального бюджета в виде компенсации части процентной ставки на период инвестиционной фазы проекта. Таким образом, система «зелёной таксономии» стимулирует инвесторов к реализации климатических проектов и является одним из действующих механизмов снижения выбросов ПГ в России.

Знаковым примером внедрения «зелёных» технологий в несырьевых отраслях является проект организации железнодорожного сообщения с применением поездов на водородных топливных элементах на Сахалине. По итогам рассмотрения концепции и результатов комплексной финансовой модели проекта развития железнодорожного сообщения на водородных топливных элементах ОАО «РЖД», Правительство Сахалинской области, Госкорпорация «Росатом» и АО «Трансмашхолдинг» подписали протокол о признании водородного проекта целесообразным и технически осуществимым. Запуск пассажирского сообщения с использованием водородных поездов на Сахалине предполагается осуществить до конца 2025 года. Предстоит создать непосредственно на Сахалине малотоннажное

производство водорода и сеть топливозаправочных комплексов, сформировать пилотный полигон и запустить регулярное пассажирское железнодорожное сообщение. На базе островного университета будет создан центр компетенций для подготовки необходимых кадров.

В стратегическом плане, чтобы оценить степень развития компании («как есть сейчас» и «куда идти») в области устойчивого развития, в том числе в части экологической составляющей, можно пойти двумя не исключающими друг друга путями:

1. Самостоятельно оценить масштабы «бедствия» при наличии компетенций внутри компании.

2. С помощью внешнего консультанта сделать рейтинговую оценку по всем трём сегментам устойчивого развития (экология, социология, управление) в одной из нескольких российских рейтинговых компаний с учетом критериев и требований к системе верификации проектов устойчивого развития в Российской Федерации. Методологии, которые используют рейтинговые компании, представлены в открытом доступе на сайтах соответствующих организаций [12, 13].

Важно отметить, что отсутствие явных прямых эффектов от участия в «зелёной» повестке для небольших компаний не снимает для них актуальность этой темы, как минимум по двум причинам:

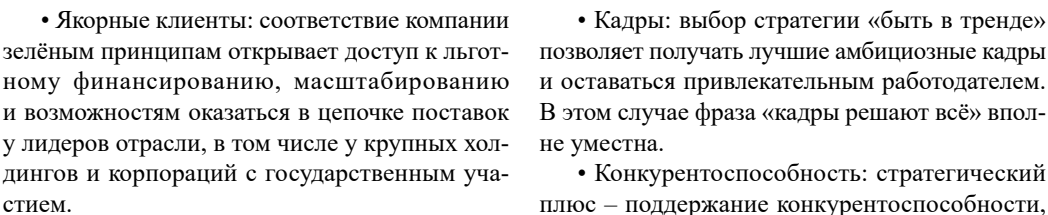
- Легче сразу небольшую компанию или стартап поставить на правильные рельсы, чем потом разворачивать или переструктурировать крупный бизнес.

- Экологический сегмент для бизнеса является важной составляющей общего понятия «устойчивое развитие» или принципов ESG. Благодаря структурированию всех трех сегментов (Environment, Social и Governance) для компании могут открыться новые горизонты роста и возможности для оптимизации бизнеса.

Для структурирования российских процессов обращения УЕ (углеродные единицы, образуются на добровольном рынке сокращения выбросов ПГ) и ЕВК (единицы выполнения квоты, образуются в объеме сокращения выбросов ниже квоты) и выбора целевого сценария монетизации парниковых выбросов можно рассмотреть следующую схему (рисунок ниже). Возможна комбинация сценариев в зависимости от динамики соотношения выбросов и квоты эмитента в каждом отдельном случае.

В общем виде преимущества для любой компании при формировании «зелёной экономики» следующие:





прежде всего завтрашнего дня, когда очередной технологический цикл уберёт с рынка компании, которые сегодня не хотят вкладываться в ответственное ведение своего бизнеса.

• Капитализация: все компании с долгосрочными целями развития всегда ориентируются (не всегда публично) на какую-нибудь линию, миссию или философию движения. Даже если без чётких границ и формулировок – это вопрос времени. ESG-повестка с экологической составляющей позволяет компании публично выгодно заявить об этом. Есть оценки, что капитализация компаний, отвечающих ESG-критериям, растёт быстрее всех прочих.

Также нельзя забывать о российской смекалке, которая умеет аккуратно замещать одно другим, уклоняясь от прямого воздействия регуляторов. Многие российские промышленные компании вполне справедливо заменяют понятие «экология» словом «безопасность». И здесь не поспоришь, так как безопасность работы промышленного оборудования и людей на рабочих местах является не менее важным делом и риском для компании, чем выбросы парникового газа.

В частных задачах предварительной оценки уровня возможной квоты для региональной регулируемой организации рекомендуется учитывать следующие аспекты:

1. Формула расчёта квоты для первого российского квотируемого региона, Сахалинской области, может сохранить свою первоначальную методику для других субъектов РФ [14]. Отметим, что методика проходила публичную стадию обсуждения, когда регулятором рассматривались замечания эмитентов. Так что ни что не мешает эту методику транслировать на все регионы – кто хотел, тот уже озвучил замечания. В случае если для каждого субъекта будет устанавливаться разная методика расчёт квот, то в каждом случае проект этой методики будет проходить этап предварительного публичного согласования и корректировок по замечаниям эмитентов. Окно периода публичного обсуждения составляет всего несколько недель; здесь главное для эмитента выброса заранее выработать собственную позицию и при этом оперативно транслировать замечания регулятору или разработчику методики [15].

2. Попадёт ли компания под квотирование, зависит не только от выбросов парниковых газов, но и от позиции субъекта и Правительства Российской Федерации. Тем не менее, на текущий момент имеет смысл оцифровать возможные затраты компании в случае назначения квот, чтобы учесть в бюджете наступающие риски.

3. Кроме этого, в методике расчёта квот на выбросы парниковых газов не прописан алгоритм учёта и распределения квот при наличии углеродного следа одной компании на территории разных субъектов Российской Федерации, например, не рассмотрена возможность зачёта превышения квот в одном регионе накопленными единицами выполнения квот другого региона в рамках деятельности одного юридического лица. Здесь для стратегического анализа тоже лучше брать в расчёт «худший» сценарий, когда нет возможности использовать взаимозачёт.

4. Если режим квотирования будет распространяться на все субъекты Российской Федерации, может потребоваться опережающая разработка собственной климатической стратегии компании, учитывающей прогнозную расчётную квоту для эмитента. Отметим, что на 2022 г. о климатических планах по снижению выбросов парниковых газов заявлено более чем в сотне известных российских компаний, что повлечёт корректировку их планов и стратегий при распространении на них квот. Затраты на эти дополнительные работы нужно тоже учитывать, если принимать климатическую стратегию ранее, чем появится квотирование в регионе. Возможно, сейчас стоит закрепить за должностным лицом компании весь спектр «зелёных» компетенций и оценить все риски. Это позволит быть готовым к резкому ужесточению углеродного регулирования, например, к коротким срокам достижения углеродной нейтральности эмитента выбросов.

5. В случае распространения режима квотирования на соответствующий регион присутствия компании, планируемые ранее мероприятия по снижению выбросов парниковых газов желательно реализовывать уже после определения квоты. За счёт эффекта «высокой базы» можно сразу высвободить единицы выполнения квоты, которые потом можно использовать в зачёт будущего превышения квот или, как вариант, продать. К моменту распространения квот на все регионы рыночные индикативы на их стоимость уже дадут о себе знать, поэтому проблем с ликвидностью не должно быть.

Для развития добровольного углеродного рынка отметим нюансы:

1. Оценка потребности реализовывать климатические проекты должна учитывать не только прямой экономический эффект (продажа премиальной продукции, реализация выпущенных углеродных единиц, экономия на штрафах за выбросы или снижение платы за превышение выбросов над квотой) или имиджевые плюсы, но и косвенные преимущества на качественном



уровне, которые сейчас невозможно просчитать с достаточной достоверностью (возможность не потерять рынок сбыта в будущем, удержание прогрессивных амбициозных сотрудников, будущее ужесточение фискальной политики со стороны регуляторов, налоговые преференции и льготное финансирование в будущем, тендерные проходные баллы и прочее).

2. В случае реализации климатического проекта с добровольным выпуском углеродных единиц [16], последние можно пустить в зачёт превышения выбросов над квотами или продать, чтобы исключить двойной счёт. То есть если региональная регулируемая организация выпустила углеродные единицы и снизила выбросы ниже квоты, сформировав единицы выполнения квоты, то регулятор не зачтёт на углеродный счёт в реестре одновременно и УЕ, и ЕВК. Придётся выбирать, исходя из конъюнктуры рынка, – что обладает большей ликвидностью и стоит дороже [17]. В случае выбора ЕВК достаточно реализовать мероприятие без регистрации климатического проекта для экономики на регистрационных сборах – несколько миллионов рублей за каждый климатический проект (валидация плюс верификация климатического проекта).

3. Прежде, чем проектировать климатическое мероприятие, стоит убедиться, что оно подпадает под критерии климатического проекта.

Применительно к железнодорожной отрасли коротко подчеркнём ключевые направления реализации принципов «зелёной экономики»:

1. повышение уровня эффективности использования ресурсов;
2. уменьшение негативного воздействия на окружающую среду;
3. обеспечение соответствия природоохранной деятельности современному уровню развития науки и техники;
4. снижение потенциальных рисков в области охраны окружающей среды и экологической безопасности при осуществлении деятельности;
5. совершенствование системы управления в области охраны окружающей среды и экологической безопасности;
6. повышение приоритетности вопросов экологической безопасности и охраны окружающей среды;
7. повышение культуры экологической безопасности производственных процессов.

В целом, учёт принципов устойчивого развития позволяет компаниями минимизировать ESG-риски – риски безответственного подхода к окружающей среде, социальной политике и корпоративному управлению. Недооценка ESG-рисков

влечёт значимые потери в различных сферах деятельности компании: это репутационные риски, ослабление позиций компании на рынке транспортно-логистических услуг, снижение привлекательности для потенциальных инвесторов, в том числе в плане реализации «зелёных» технологий и цифровой трансформации, нарушение цепочек поставок и технологическое отставание от компаний-аналогов на мировом рынке.

С учётом лидирующих позиций холдинга «РЖД» в транспортной системе страны и принципов устойчивого развития основными направлениями реализации критериев ESG в перспективе до 2030 г. являются:

- в части формирования «зелёной экономики» – уменьшение негативного воздействия на окружающую среду за счёт модернизации инфраструктуры и внедрения наилучших доступных технологий в природоохранной деятельности, а также повышение уровня эффективности использования ресурсов с постепенным внедрением элементов экономики замкнутого цикла;
- в части социальной ответственности холдинга «РЖД» – обеспечение безопасности движения поездов, техносферной безопасности, снижение частоты возникновения аварий и экологических катастроф, продвижение ценностей и принципов здорового образа жизни как элемента корпоративной культуры ОАО «РЖД»;
- в области корпоративного управления – достижение технологического суверенитета по ключевым направлениям научно-технологического развития, вовлечение работников, клиентов и поставщиков в деятельность по осуществлению принципов устойчивого развития.

ВЫВОДЫ

В настоящее время существует 1800 законов об изменении климата [18]. Российская климатическая повестка как составляющая процессов устойчивого развития подкреплена международными обязательствами Российской Федерации и двумя ключевыми российскими федеральными законами от 2021 и 2022 года. Несмотря на многочисленные противоречивые мнения о необходимости вовлечения российского бизнеса в климатические процессы в рамках устойчивого развития есть чёткие сигналы, что это не временные процессы, а устойчивая парадигма общества. Лучшим тому подтверждением будет принятие государством климатического пакета документов. В результате преимущество на корпоративном рынке будет оставаться за системообразующими компаниями с минимальным углеродным следом. Локомотивом в этом вопросе на отече-

ственном рынке выступает ОАО «РЖД» как лидер реализации критериев ESG.

Учёт результатов данного исследования мог бы позволить российским компаниям, осуществляющим последовательный переход на рельсы «зелёной экономики», сфокусировать свою климатическую позицию при ужесточении углеродного регулирования в Российской Федерации, быть готовыми оперативно принимать стратегически верные решения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Через ESG к устойчивому развитию. [Электронный ресурс]: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583552&archive=2021.10.21>. Доступ 10.01.2023.

2. Энергетический бюллетень «Трансграничное углеродное регулирование: вызовы и возможности», Аналитический центр при Правительстве РФ, № 98, июль 2021. [Электронный ресурс]: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2021/бюллетень_№_98.pdf. Доступ 10.01.2023.

3. Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил создания и ведения реестра углеродных единиц, а также проведение операций с углеродными единицами в реестре углеродных единиц» от 30.04.22 № 790. [Электронный ресурс]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205050004>. Доступ 10.01.2023.

4. McKinsey & Company. [Электронный ресурс]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>. Доступ 10.01.2023.

5. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/607142402>. Доступ 10.01.2023.

6. Стартовали биржевые торги на товарных аукционах. [Электронный ресурс]: <https://carbonreg.ru/ru/news/2/>. Доступ 10.01.2023.

7. Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах РФ». [Электронный ресурс]: <https://fzrf.ru/zakon/2022-03-06-n-34-fz-st-1.php?ysclid=ln1oct2rxz737718612>. Доступ 10.01.2023.

8. Постановление Правительства РФ от 24.03.2022 № 455 «Об утверждении Правил верификации результатов реализации климатических проектов». [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/350066706>. Доступ 10.01.2023.

9. Приказ Минприроды РФ от 30.06.2015 № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов

парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации». [Электронный ресурс]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=264381>. Доступ 10.01.2023.

10. Приказ Минэкономразвития России от 06.05.2022 № 247 «Об утверждении порядка отнесения юридических лиц и индивидуальных предпринимателей к региональным регулируемым организациям в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации». [Электронный ресурс]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=423475>. Доступ 10.01.2023.

11. Презентация ВЭБ РФ «Применение проектного финансирования в условиях ограниченного капитала пример ответственного финансирования и ESG», ноябрь 2021 г. [Электронный ресурс]: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/533820921.pdf>. Доступ 10.01.2023.

12. Методология ESG-оценки. [Электронный ресурс]: <https://www.acra-ratings.ru/criteria/2623/>. Доступ 10.01.2023.

13. Методология присвоения некредитных рейтингов, оценивающих подверженность компании экологическим и социальным рискам бизнеса, а также рискам корпоративного управления (ESG-рейтингов). [Электронный ресурс]: https://www.ranational.ru/sites/default/files/ESG%20Rating%20Methodology%20NRA_2020.pdf. Доступ 10.01.2023.

14. Приказ Минэкономразвития России от 24.08.2022 № 452 «Об утверждении методики определения проектируемых квот выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации». [Электронный ресурс]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=432075>. Доступ 10.01.2023.

15. Федеральный портал проектов нормативных правовых документов. [Электронный ресурс]: <https://regulation.gov.ru/projects>. Доступ 10.01.2023.

16. Распоряжение Правительства РФ от 01.03.2022 № 367-р «Об определении уполномоченного юридического лица, осуществляющего функции оператора реестра углеродных единиц». [Электронный ресурс]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203020028>. Доступ 10.01.2023.

17. Постановление Правительства РФ от 18.08.2022 № 1441 «О ставке платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области». [Электронный ресурс]: <http://government.ru/docs/all/142679/>. Доступ 10.01.2023.

18. Eskander S. M. S. U., Fankhauser S. Reduction in greenhouse gas emissions from national climate legislation. Nature Climate Change, 2020, Vol. 10, Iss. 8, pp. 750–756. DOI:10.1038/s41558-020-0831-z. ●

Информация об авторах:

Лёвин Борис Алексеевич – доктор технических наук, профессор, президент Российского университета транспорта, Москва, Россия, tu@miit.ru.

Цветков Виктор Яковлевич – доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, заместитель по науке директора юридического института Российского университета транспорта, Москва, Россия, svj2@mail.ru.

Исаин Николай Владимирович – руководитель проекта Отдела стратегического развития Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, n.isain@vniias.ru.

Охотников Андрей Леонидович – заместитель начальника Департамента информационных технологий – начальник Отдела стратегического развития Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, a.ohotnikov@vniias.ru.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023, одобрена после рецензирования 19.04.2023, принята к публикации 15.05.2023.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4:539.4(045)

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-10>

Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций



Валерий КОССОВ



Дмитрий КНЯЗЕВ



Николай КРАСЮКОВ



Николай МАХУТОВ



Михаил ГАДЕНИН

Валерий Семёнович Коссов¹, Дмитрий Александрович Князев²,
Николай Фёдорович Красюков³, Николай Андреевич Махутов⁴, Михаил Матвеевич Гаденин⁵

^{1, 2, 3}АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»
(АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия.

^{4, 5}Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия.

✉ knyazev-da@vnikti.com.

АННОТАЦИЯ

Перевод эксплуатации железнодорожной техники на договоры жизненного цикла и подтверждение соответствия её безопасности отраслевым техническим регламентам в условиях отсутствия законодательной базы по отзыву недоброкачественной продукции влекут за собой необходимость более тщательного анализа ресурсных показателей конструктивных составляющих подвижного состава и верхнего строения пути. Под таким углом зрения рассмотрены состояние имеющейся нормативной базы подтверждения критериев прочности и ресурса несущих элементов подвижного состава и пути, влияние регуляторной «гильотины» и общий переход от системы советских ГОСТов и норм прочности к современным подходам к сертификации и разделению таких понятий, как «стандарт» и «поддерживающий стандарт».

На примерах проводимых ранее работ по обеспечению безопасности эксплуатации рамы тележки ЭР200 и работ по переходу на отечественные кассетные подшипники в рамках импортозамещения, проводимых в настоящее

время для разных типов подвижного состава, показаны тенденции отхода от классических методов стендовых испытаний, внедрение ресурсного подхода с оценкой дефектности.

Основываясь на этих новых методах и подходах, возможно рассматривать более длительные периоды эксплуатации, обоснованно давать оценку продлению срока службы или назначать ресурсовосстанавливающую технологию, обеспечивая дальнейшую безопасную эксплуатацию. В рамках этих новых тенденций осуществляется переход к современным методам моделирования оценки безопасности продукции, внедряются такие понятия, как «виртуальный датчик» и «виртуальная система «поезд – путь»». Показано, что разумное сочетание натурных эксплуатационных испытаний и виртуального цифрового моделирования позволяют в сжатые сроки дать достоверные оценки показателей ресурса и безопасности на стадиях проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, прочность, нагруженность, ресурс, подвижной состав, натурные стендовые и эксплуатационные испытания, виртуальные цифровые модели и испытания, подтверждение безопасности.

Для цитирования: Коссов В. С., Князев Д. А., Красюков Н. Ф., Махутов Н. А., Гаденин М. М. Нормативная база обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Перевод в Российской Федерации эксплуатации железнодорожной техники на договоры жизненного цикла и необходимость подтверждения соответствия её безопасности отраслевым техническим регламентам в условиях отсутствия законодательной базы по отзыву недоброкачественной продукции влекут за собой необходимость более тщательного анализа ресурсных показателей конструктивных составляющих подвижного состава и верхнего строения пути.

Разработка методологии комплексного расчётно-экспериментального обоснования надёжности ведётся в рамках соглашения между ОАО «РЖД» и РАН.

Важное значение имеют прикладные задачи на примере подвижного состава, которые решены учёными АО «ВНИКТИ», АО «ВНИИЖТ» совместно с ИМАШ РАН.

Ввиду отсутствия в Российской Федерации закона об отзыве недоброкачественной продукции уже на стадиях заключения договоров жизненного цикла возникает необходимость ресурсного анализа и в дальнейшем внесения полученных в ходе него оценок в договоры и процесс управления ресурсом эксплуатации объектов подвижного состава и железнодорожного транспорта на основе таких договоров. Все это связано с законом о техническом регулировании¹, из которого органически вытекают технические регламенты, ставящие конкретные задачи по безопасности. Появляется понятие «риск»,

¹ Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г. – 129 с. [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/?ysclid=lnbusufwwa679963992. Доступ 24.05.2023.

оцениваемое через ресурс. В законе о стандартизации², к сожалению, перестали присутствовать нормы прочности³.

В связи с этим ОАО «РЖД» была инициирована исследовательская работа, где АО «ВНИКТИ» на основе обобщения отраслевого опыта применения нормы прочности создаёт базу для появления нового документа – информационно-технического справочника, что предусмотрено законом о стандартизации (рис. 1)³.

Целью работы является обобщение результатов разработки методологии комплексного расчётно-экспериментального обоснования надёжности и формирования нормативно-правовой базы безопасной эксплуатации железнодорожной техники по ресурсу несущих конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ресурс и безопасность должны подтверждаться на основе расчётов и испытаний с использованием апробированных методов (рис. 2). При этом необходимо уметь качественно, с оценкой вероятности, рассчитывать ресурс на стадии проектирования. Это должно закладываться при производстве, во всей технологической базе и в инструментари, поддерживаться на стадии эксплуатации всеми методами диагностики и обслуживания.

² Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29 июня 2015 г. – 74 с. [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/?ysclid=lnbuuhjtmn504679735. Доступ 24.05.2023.

³ Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: МПС, 1998. – 145 с.

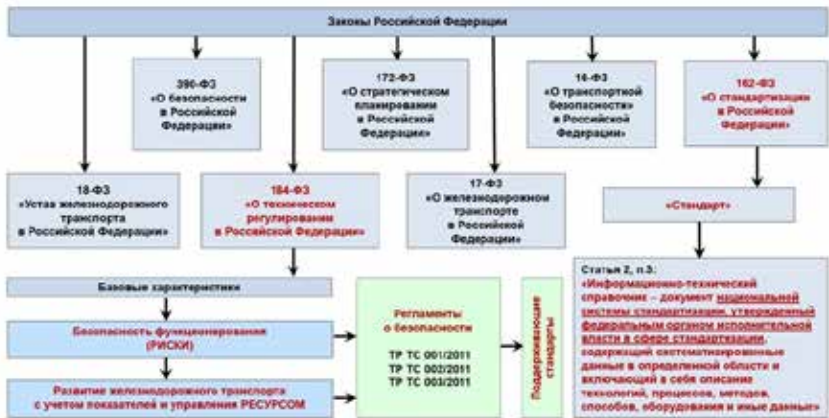


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязи законодательных и нормативных актов по безопасности на транспорте [здесь и далее схемы и диаграммы подготовлены с участием авторов].





Таблица 1

**Анализ состояния государственных стандартов, поддерживающих
технические регламенты объектов технического регулирования (ОТР)
железнодорожного транспорта, по наличию показателей надёжности
и методов оценки ресурса объектов ОТР**

Технический регламент таможенного союза	Поддерживающие стандарты		ОТР (количество)		
	Технические требования	Методы контроля			
ТР ТС 001/2011	173	167	Подвижной состав (17)	Составные части ПС (44)	—
ТР ТС 002/2011	98	116	Составные части инфраструктуры (20)	Элементы составных частей инфраструктуры (54)	Составные части высокоскоростного подвижного состава (67)
ТР ТС 003/2011	76	84	Составные части инфраструктуры (30)	Элементы составных частей инфраструктуры (64)	
Итого	347	367	67	162	67
	714		296		

В табл. 1 в рамках существующих подходов к сертификации и проведению приемочных испытаний выделены понятия «стандарт» и «поддерживающий стандарт». Поддерживающий стандарт несёт в себе сертификационные требования. Он реализуется через 710-е решение Межгосударственной комиссии Таможенного союза⁴. Всего создано около 900 стандартов, при этом по надёжности их всего 24, по прочности и ресурсу – 18, а по методикам их почти нет. Нормативная «гильотина» отсекала нормы прочности и многие ГОСТы, которые были в СССР. Отсюда необходимость возвращаться к этому, на что и нацелена совместная работа АО «ВНИКТИ» с ИМАШ РАН.

Основные стандарты по испытаниям, прочности и ресурсу железнодорожного транспорта:

1. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
2. ГОСТ Р 53076-2008. Рельсовый транспорт. Требования к прочности кузовов железнодорожного подвижного состава.

⁴ Решение Комиссии Таможенного союза «О принятии технических регламентов Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава», «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» и «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» № 710 от 15 июля 2011 г. 82 с. [Электронный ресурс]: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0710/?ysclid=lncutwnj2j999365223>. Доступ 24.05.2023

3. ГОСТ 31373-2008. Колесные пары локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Расчёты и испытания на прочность.

4. ГОСТ 31846-2012. Специальный подвижной состав. Требования к прочности несущих конструкций и динамическим качествам.

5. ГОСТ Р 55495-2013. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам.

6. ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам.

7. ГОСТ Р 55514-2013 Локомотивы. Методика динамико-прочностных испытаний.

8. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.

9. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Метод испытаний на прочность и динамические качества.

10. ГОСТ 33272-2015. Безопасность машин и оборудования. Порядок установления и продления назначенных ресурсов, срока службы и срока хранения. Основные положения.

11. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса.

12. ГОСТ Р 15700.10-2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области.



Рис. 2. Исходные положения ТР ТС 001/2011.

Примечание: Технический регламент Таможенного союза 001/2011 «О безопасности на железнодорожном транспорте» (ТР ТС 001/2011). Принят решением ЕЭК № 710 от 15 июля 2011 г., 59 с. [Электронный ресурс]: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNS_r00ABXdSAAZyY3Rpb24AAAABABJjaGFuZ2ZVta2luVmlzdWFSbHkABXRoZW1IAAAAAQAcG93LWJsYWNRlXNob3ctcHRzYW5zLWxzWmVybwAHX19FT0ZlXw**&portal:componentId=abfaa8e6-70cc-47aa-8946-0fd2b2df47b3. Досмун 24.05.2023.

Любой из этих стандартов, если его сравнивать с ранее действовавшими нормами прочности³, намного короче. Нормы прочности – это документ объемом около 200 с. вместо 30–50 с., которые имеют стандарты. В них приводятся только основные критериальные соотношения, но вся методическая база отсутствует. Раньше структура промышленности была однородна, управлялась Совмином СССР, а сейчас, в связи с появлением конкуренции компаний, вопрос правил расчёта, сопоставления расчётов становится все более актуальным. Нужно, чтобы и работник завода-изготовителя, и ученый, и работник эксплуатации ОАО «РЖД» примерно по одним правилам рассматривали вопросы ресурса и его обеспечения.

Так, в настоящее время закончены испытания пяти объектов буксовых подшипников кассетного типа, в том числе трех китайских производителей и двух отечественных производителей. Получены положительные результаты испытаний на базе, воспроизводящей 400 тыс. км пробега. Сейчас ведутся испытания кассетного подшипника на электровозах 2ЭС6 производства ООО «Уральские локомотивы», также проходят испытания подшипников кассетного типа грузовых вагонов уже практически полностью с российской комплектацией (кольца внутренние, наружные, крепёж, смазка). В 2023 году предстоят испытания кассетных подшипников для грузовых вагонов с нагрузкой 25 тс уже в полной российской комплектации, предстоят испытания подшипников для высокоскоростного отечественного подвижного состава на базе 600 тыс. км пробега, будут проводиться испытания подшипников скоростного электровоза ЭП20.

На основе выявленных тенденций будут выработаны методики, позволяющие анали-

зировать ресурс на всех стадиях жизненного цикла⁵.

На рис. 3 представлена история [1] развития науки о прочности конструкций машин, начиная с сопротивления материалов, развития моделей, теории упругости, до вопросов живучести, безопасности, рисков и оценки этих параметров.

В табл. 2 представлена оценка прочности и ресурса по допускаемым напряжениям, коэффициентам запаса. На стадиях проектирования, предварительной проработки конструкций, принятия габаритных решений, инженерного видения проекта такая оценка необходима [2].

Затем следует оценивать ресурс. Для этого необходимо построить кривую усталости с определением предела выносливости и оценкой повреждаемости [2] (рис. 4). Расчёт ресурса предполагает накопление повреждаемости по мере наработки детали и достижения разрушающего числа циклов. Далее можно перейти к оценке ресурса в годах эксплуатации. Но это только на этапе развития ресурсного подхода.

Развитие подхода заключается в том, что нужно оценивать и дефектность. Крупного вагонного литья без дефектов не бывает. На рис. 5 показан пример модели механики разрушения с развитием трещиноподобного дефекта, даны соответствующие оценки. Здесь представлены элементы моделирования дефектов, исследования нагруженности, учёт наработок в области механики деформированного тела, механики разрушения с оценкой числа циклов, пробега и перевода в годы эксплуатации (табл. 3).

⁵ ГОСТ 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса. – М.: Стандартиформ, 2017. – 26 с. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746291.pdf?ysclid=lnv2au9ff644715443>. Доступ 24.05.2023.



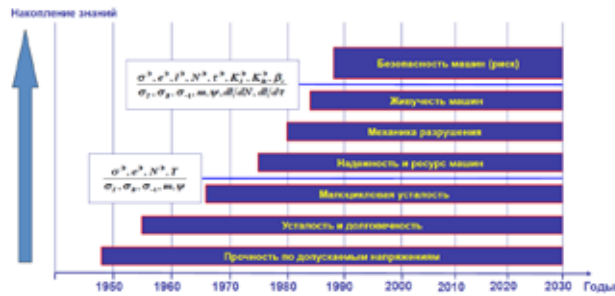


Рис. 3. Современное состояние и этапы развития научных дисциплин прочности, ресурса и безопасности.

Таблица 2

Условия прочности по действующим нормам

Тип подвижного состава	Оценка статической прочности по допускаемым напряжениям		Оценка сопротивления усталости по допускаемому коэффициенту запаса n
	I режим	III режим	
Локомотивы	$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma_T$	$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,55 \cdot \sigma_T$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m} \geq 2$
Вагоны		$\sigma_s \leq [\sigma] = 0,60 \cdot \sigma_T$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_{a3}} \geq 1,4 \dots 1,8$

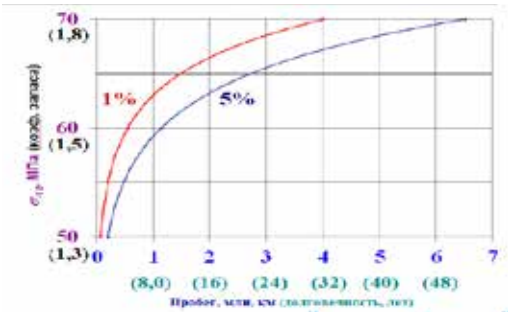


Рис. 4. Оценка ресурса боковой рамы грузового вагона на этапе проектирования:
1%, 5% – повреждаемости.

На рис. 6 показан комплекс работ, проведённых по раме тележки ЭР200 в период, когда остро стоял вопрос обеспечения безопасности эксплуатации электропоезда в течение 2–3 лет до введения в эксплуатацию поездов «Сапсан». Эта работа была успешно проведена АО «ВНИКТИ» совместно с АО «ВНИИЖТ» и ИМАШ РАН. Была сформирована гистограмма эксплуатационной нагруженности, проведён расчёт, выявлены наиболее нагруженные зоны, установлены концентраторы, определены уровни остаточных напряжений. Для изложенных условий была выполнена оценка числа поездок электропоезда ЭР200 в зависимости от величины остаточных напряжений (табл. 4). В последующем проводился постоянный осмотр этих рам тележек, их мониторинг, своевременное восстановление (ремонт) или изъятие.

Переходя на ресурсный подход, исследователи уже начинают отходить от классических подходов сопротивления материалов и кривых усталости с горизонтальной правой ветвью из-за того, что даже при наработках, сопоставимых с 40 годами эксплуатации и выше, подходы, основанные на неограниченной выносливости детали, не работают (рис. 7). Тогда правая ветвь графика усталости имеет наклон, входит в зону гигацикловой усталости. Для примера оценки были взяты поездки поезда «Сапсан», эксплуатируемые на маршруте Москва – Санкт-Петербург. Для этого поезда срок службы ТУ установлен в 15 млн км пробега или 30 лет эксплуатации. Полный цикл нагружения за указанный срок службы – это число оборотов колес (5×10^9). Такой объём наработки, даже в стендовых условиях – это годы испытаний при имеющихся технических возможностях. За 65 лет в АО «ВНИКТИ» провели испытание всего порядка пяти образцов осей на базе 10^8 , которые позволили дать оценку углу наклона правой ветви кривой усталости [3]. И теперь, основываясь на этих разработках, можно говорить о длительных периодах эксплуатации и обоснованно давать оценку продлению срока службы или назначать ресурсовосстанавливающую технологию и обеспечивать дальнейшую безопасную эксплуатацию.

АО «ВНИКТИ» совместно с ИМАШ РАН разработан вышеуказанный проблемно-ориентированный ГОСТ⁵, который задаёт

Таблица 3

Зависимость ресурса от различных дефектов в литых элементах

Перечень исследуемых факторов	Ресурс		
	Число циклов	Пробег	Лет (при 120 тыс. км/год)
Пониженная пластичность литой стали 20ГЛ: – относительное удлинение 7...16 % вместо 18 %; – относительное сужение 8...19 % вместо 25 %	2,70х10 ⁹	3118	26
Отсутствие термообработки при заварке литейных дефектов в радиусе R55	279х10 ⁶	322	2,7
Наличие внутренних дефектов литья (газовая пора, трещина) в зоне R55	13,8х10 ⁶	153	1,3

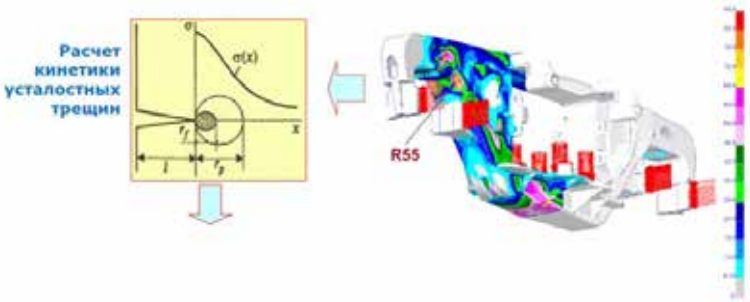


Рис. 5. Исследование ресурса литой боковой рамы тележки грузового вагона.

Таблица 4

Величины максимальных остаточных напряжений

Зона кронштейна тягового двигателя			Зона буксового кронштейна		
Остаточные напряжения, МПа	Ресурс		Остаточные напряжения, МПа	Ресурс	
	Число поездок	Лет		Число поездок	Лет
240	320	3,1	240	308	3,0
200	460	4,4	200	420	4,0
150	852	8,0	150	544	5,0

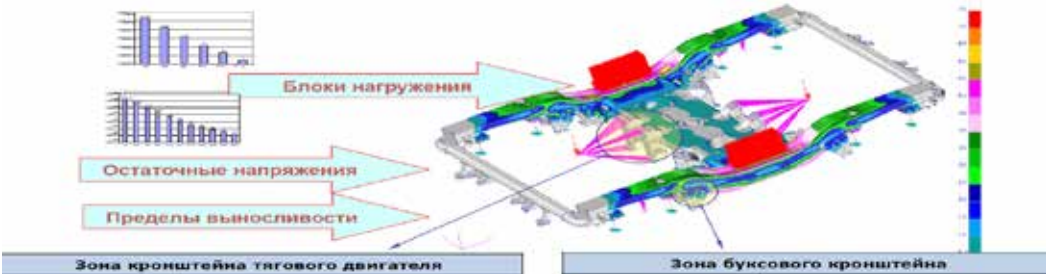


Рис. 6. Оценка остаточного ресурса рам тележек ЭР200 для участка движения Санкт-Петербург – Москва.

основные направления работ и определяет требования к расчёту ресурса. В нем указано, что, прежде всего, важен вопрос об определении несущих и силовых систем (рис. 8). Ресурс обусловлен всеми особенностями эксплуатации, то есть необходимо решение технико-экономической задачи: одни объекты должны обеспечить абсолютный ресурс и могут безопасно эксплуатироваться, а другие должны быть своевременно изъяты, отремонтированы или утилизированы. Но в любом случае объект должен работать надёжно между плановыми ремонтами.

Во всех сложных расчётных программах есть понятие «виртуальный датчик». Помещая его в любую интересующую зону, а это, прежде всего, зона концентраций напряжений, наиболее нагруженная зона, на стадии виртуального моделирования получаем виртуальную нагруженность. Эту нагруженность можно перевести в блоки напряжений, и, сопоставляя их с кривыми усталости материалов или объектов, деталей, оценивать ресурс с необходимой точностью. Достаточная точность с необходимой вероятностью неразрушения обеспечивается сопоставлением численных виртуальных экс-



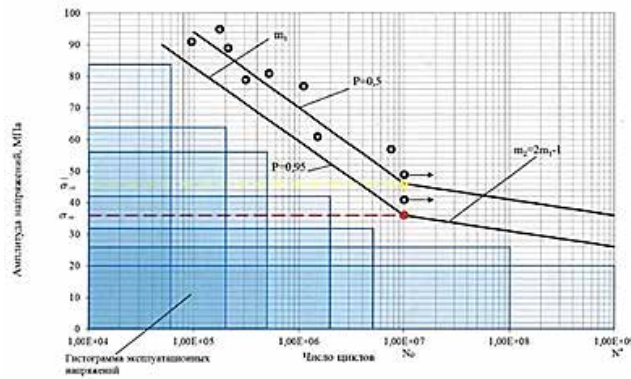


Рис. 7. Пример расчета ресурса боковины рамы тележки: m_1 и m_2 – показатели угла наклона кривой усталости; P – вероятность разрушения; N_0 , N^* – базы испытаний; σ – пределы выносливости детали.

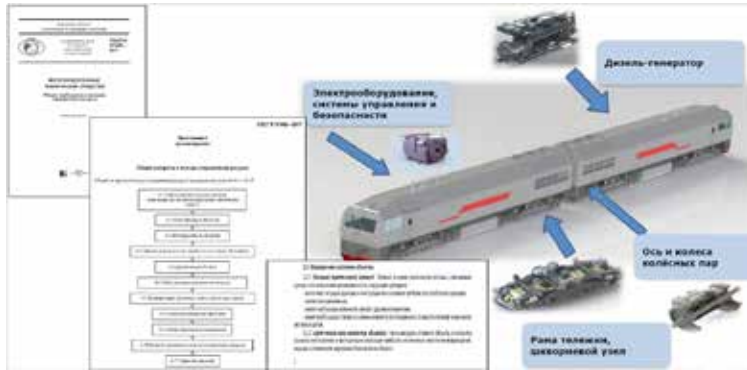


Рис. 8. Базовые элементы, определяющие ресурс и безопасность эксплуатации локомотива.

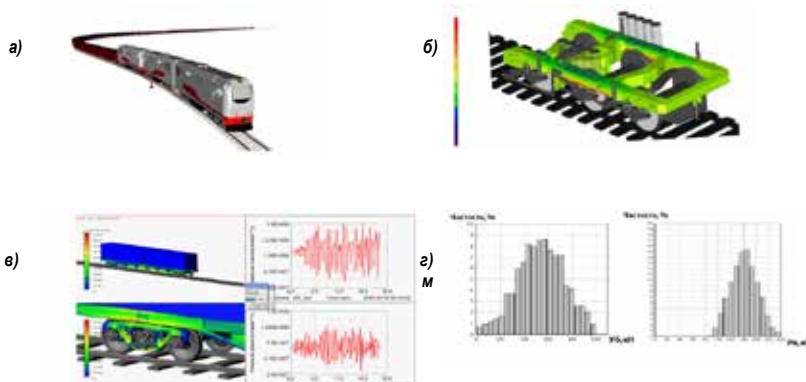


Рис. 9. Схематичный пример реализации подхода с использованием цифровых моделей для определения эксплуатационной нагруженности: а – твердотельная модель движущегося поезда; б – упругая КЭ-модель тележки локомотива; в – упругая КЭ-модель грузового вагона; г – распределение боковых (Y) и вертикальных (P) сил от колес на рельсы.

периментов с накопленными опытными данными по результатам проведённых стендовых и поездных испытаний.

При моделировании наряду с твердотельными составными частями подвижного состава создаются конечно-элементные упругие модели исследуемых конструкций (кузовов, рам, деталей, тягового привода и др.), достаточно полно отражающие силовой поток несущей системы или передачу силы тяги.

На рис. 9 показан общий вид сформированных для расчётов блоков нагрузок и их развертки [4], полученных в модельных и натурных экспериментах. Взаимодействие «поезд – путь» в сочетании с воздействием реально замеренных на участке эксплуатации, например Восточном полигоне, неровностей, отклонений, рихтовок пути, повреждений колес позволяет получить реальную нагруженность и достичь необходимой вероятности оценки ресурсных показателей.

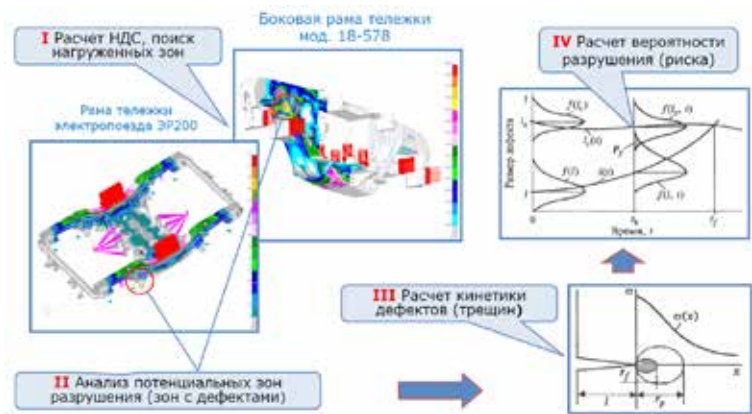


Рис. 10. Обобщенная схема риск-анализа несущих элементов подвижного состава.

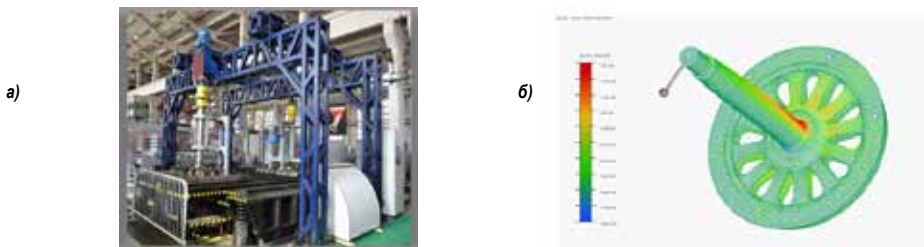


Рис. 11. Стенд для испытаний осей и колес на усталость циклически изменяющимся круговым изгибом: а) общий вид натурального стенда; б) виртуальный аналог стенда для испытаний «колесо – ось».

Таблица 5

Сравнение нормативных документов по базе испытаний

Требования стандартов в Европе		Требования стандартов в России	
База испытаний	Нормативные документы	База испытаний	Нормативные документы
Подтверждение предела выносливости осей на базе 10^7	DIN EN 13260	Подтверждение предела выносливости осей на базе 10^7	ГОСТ 33783 ГОСТ 11018 ГОСТ 4835
Подтверждение предела выносливости колес на базе 10^7	DIN EN 13262	Подтверждение предела выносливости колес на базе 10^7	

На рис. 10 рассматриваются два объекта: боковина тележки грузового вагона и рама тележки электропоезда ЭР200. Этот подход сейчас активно реализуется в АО «ВНИКТИ» с использованием приведённых выше моделей с интегрированием их в цифровую технологию.

В 2023 году и далее АО «ВНИКТИ» полагает целесообразным сосредоточиться на выявлении глубинной взаимосвязи конечно-элементного (КЭ), реально механистического подхода и статистических моделей, включая нейронные сети. Сами по себе механические модели являются источником базы больших данных, но их нужно сопоставлять и корректировать в соответствии с данными эксплуатации [5].

На рис. 11 показан пример испытания осей и колёс как возможность разрабатывать виртуальные стенды и испытания [6, С. 61–65].

В табл. 5 приведены оценки количества циклов до разрушения, сопоставление получаемых результатов с нормативной базой.

Выводы

Основываясь на изложенном, можно сделать вывод о том, что виртуальные испытания железнодорожной техники путём численного моделирования (разработки и исследования адекватных цифровых моделей) имеют важное значение для безопасности движения, позволяя достигать целей [7, С. 69–72; 8, С. 27–29]:

- оценки ходовых и динамических качеств, прочности, ресурса и безопасности подвижного состава (ПС);
- исследования характеристик и работоспособности пути;
- исследования взаимодействия ПС, пути, их нагруженности.



Кроме того, виртуальные испытания помогают решить задачи:

- исследования НДС конструкций крупногабаритных и сложнагруженных объектов;
- исследования концентрации напряжений (в том числе с использованием виртуальных датчиков) в элементах конструкций, сварных и литых деталей;
- моделирования экстремальных и аварийных условий и видов нагружения объекта;
- моделирования совместных и отдельных компонентов и видов воздействий сложнонагруженных объектов (механических, тепловых и др.).

Методы использования программных средств:

- выбор и обоснование моделей в зависимости от постановки задачи (статика, кинематика, динамика) и области решения;
- создание конечно-элементных 3D-моделей исследуемых объектов;
- доводка КЭ-моделей с учетом конструктивных особенностей объекта (стержни, пластины, оболочки и пр.);
- выбор и обоснование КЭ-сетки;
- подтверждение соответствия модели поставленной задаче и исследование границ применимости решения;
- верификация и валидация модели и результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оганьян Э. С., Волохов Г. М. Расчёты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2013. – 326 с. ISBN: 978-5-89035-618-5.
2. Махутов Н. А., Гапанович В. А., Коссов В. С., Оганьян Э. С., Красюков Н. Ф., Волохов Г. М. Методы определения ресурса и циклической прочности конструкций экипажной части локомотивов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2016. – № 10. – С. 3–12. [Элект-

ронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27180774&ysclid=lnbggnup2j283492649>. Доступ 17.04.2023.

3. Волохов Г. М., Огуенко В. В., Тимаков М. В. Линейная аппроксимация кривой усталости натурных осей колёсных пар подвижного состава в гигацикловом диапазоне // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты // Тезисы докладов VIII Междунар. научно-техн. конференции (Санкт-Петербург, 3–7 июля 2013 г.). – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 38–41. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/13Q9KxaPJpqqYS90tkclunpyeSGEh4uQ1/view> [полный текст материалов конференции]. Доступ 17.04.2023.

4. Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В. Использование генерированного блока нагрузок колёсной пары высокоскоростного подвижного состава при расчёте живучести оси // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Материалы XII Междунар. научно-практической конф. (Санкт-Петербург, 5–9 июля 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 190 с. – С. 128–130. ISBN 978-5-7641-0908-4. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/1xL6J2sKUTOLcL0G04YKxY6kLR3bHD4E/view> [полный текст материалов конференции]. Доступ 17.04.2023.

5. Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гасюк А. С., Фазлиахметов Д. М., Муравлёв Е. В. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 6. – С. 54–57. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

6. Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В. Моделирование роста трещины на полой оси моторной колёсной пары высокоскоростного подвижного состава // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век. Сб. материалов V Междунар. научно-техн. конф., посвящённой 180-летию железных дорог России (Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 455 с. – С. 61–65. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

7. Оганьян Э. С., Волохов Г. М., Гаджиметов Г. И. К вопросу о порядке обновления парка и продления сроков службы эксплуатирующихся локомотивов в свете требований ТР ТС 001/2011 // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век. Сб. материалов V Междунар. научно-технической конф., посвящённой 180-летию железных дорог России (Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 г.). – СПб.: ПГУПС, 2017. – 455 с. – С. 69–72. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

8. Волохов Г. М., Овечников М. Н., Князев Д. А., Тимаков М. В. Моделирование роста трещины в осях железнодорожного подвижного состава // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ. IV научно-технический семинар (Брянск, 3–4 апреля 2018 г.). – Брянск: Изд-во БГТУ, 2018. – 78 с. – С. 27–29. ISBN: 978-5-906967-87-9. ●

Информация об авторах:

Коссов Валерий Семенович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, vskossov@icloud.com.

Князев Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, заместитель заведующего отделом АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, knayzev-da@vnikti.com.

Красюков Николай Федорович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, timafov-mv@vnikti.com.

Махутов Николай Андреевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия, kei51@mail.ru.

Гаденин Михаил Матвеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия, safety@imash.ru.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023, одобрена после рецензирования 25.05.2023, принята к публикации 19.06.2023.



Управление рисками безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств в мегаполисе: системно-правовой анализ



Александр ЗЕМЛИН



Мария МАТВЕЕВА



Евгения ГОЦ

Александр Игоревич Землин¹, Мария Андреевна Матвеева², Евгения Валентиновна Гоц³

¹ Российский университет транспорта, Научно-экспертный совет Центра исследования проблем безопасности Российской академии наук, Москва, Россия.

^{2,3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ¹ zemlin.aldr@yandex.ru.

¹ ORCID ID 0000-0001-8988-8517, PIIHC AuthorID 326650, SPIN-код 1741-0737, Web of Science Researcher ID T-1126-2018, Scopus Author ID: 57208147055.

² ORCID ID 0000-0002-3297-4833, PIIHC AuthorID 793762, SPIN-код: 9522-1595, Web of Science Researcher ID S-2705-2018, Scopus Author ID 57211385696.

³ ORCID ID 0000-0001-7623-6798, PIIHC Author ID: 784499, SPIN code: 1349-1967.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты научного исследования актуальных вопросов управления рисками, связанными с обеспечением безопасной эксплуатации беспилотных автомобилей, полученные авторами в результатах реализации второго этапа научного проекта, поддержанного Российским научным фондом. Выводы, представленные в статье, основываются на результатах исследования правовых и организационных проблем обеспечения безопасного использования беспилотных автомобилей в условиях мегаполиса, осуществленного в период первого этапа проекта.

В ходе исследования подтвердилось предположение авторов, что решение задачи обеспечения безопасного использования беспилотных автомобилей возможно на основе научного исследования рисков, возникающих при их эксплуа-

тации. Обосновывается, что выявление, дифференциация, мониторинг рисков, детерминированных появлением на автомобильных дорогах беспилотных автомобилей, является необходимым условием для выработки научно обоснованной системы правовых мер общей и частной превенции, включающей меры юридической ответственности за соответствующие правонарушения, основанной на категорировании рисков и угроз нарушения обязательных требований, устанавливаемых в целях обеспечения безопасности на транспорте и организации дорожного движения с использованием такого рода транспортных средств.

Проанализированы принципиальные положения, заложенные в основу применения риск-ориентированного подхода в однородных и одновидовых общественных отношениях.

Ключевые слова: транспортное право, законодательство, беспилотные автомобили, транспортная безопасность, риск, риск-ориентированный подход.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-28-20334 «Правовые средства обеспечения безопасности использования беспилотных автомобилей в мегаполисе», <https://rscf.ru/project/22-28-20334/>.

Для цитирования: Землин А. И., Матвеева М. А., Гоц Е. В. Управление рисками безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств в мегаполисе: системно-правовой анализ // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-11>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.

The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Следует согласиться с утверждением о том, что социальная активность человека и формирующиеся деятельностные практики в настоящее время всё более связаны с самым широким внедрением в практику общественной жизни и использованием высоких технологий и высококомобильных или автоматизированных технических средств [1, с. 62]. В полной мере эти процессы визуализируются в функционировании транспортной отрасли, обеспечивающей логистические процессы, необходимые для функционирования иных отраслей экономики, обеспечения связанности территории страны [2, с. 45], обороноспособности и национальной безопасности государства [3, с. 101].

Внедрение инновационных технологий осуществляется на фоне разрастания и появления качественно новых вызовов и угроз как технологического, так и военного и общественного характера [2, с. 163]. Следует согласиться с мнением о том, что глобальные цивилизационные «вызовы, перед которыми стоит человечество, сопровождаются отсутствием идей относительно его дальнейшего движения. В полной мере это касается и такого феномена, как право» [4, с. 5]. К аналогичным выводам приходит значительное число представителей российской правовой науки, предмет исследования которых находится в различных отраслях правового знания [5, с. 18; 6, с. 9; 7, с. 5; 8, с. 278], что, по нашему мнению, только подтверждает общий характер утверждения, согласно которому использование высоких технологий закономерно влечет за собой существенные проблемы для правовой науки и практики правоприменения и правоисполнения.

В работах представителей транспортно-правовой науки неоднократно и вполне основательно констатировалось, что разработка и все более широкое использование автоматизированной системы вождения, ввод в эксплуатацию инновационных транспортных средств преследуют своей целью, в первую очередь, решение целого комплекса таких значимых для современной экономики задач, как снижение транспортных расходов, за счёт сокращения фонда оплаты труда водителей и сопутствующих расходов, оптимизации затрат на содержание, амортизацию, ремонт и страхование транспортных средств, экономии топлива за счёт автоматической манеры вождения [9, с. 18], обеспечения безопасности на транспорте за счет минимизации влияния человеческого фактора на аварийность на дорогах [10, с. 71] и пр.

Однако, существует и «обратная сторона медали»: внедрение высокоавтоматизированных

автомобилей в транспортный комплекс страны ставит перед правом как общественным регулятором ряд серьёзных вызовов [11, с. 15], что, несомненно, требует их учёта в процессе нормотворчества [12, с. 131].

В связи с этим необходимо критически оценить степень соответствия принятых правовых актов потребностям практики, принципам системности и взаимной непротиворечивости. Решение указанной задачи позволит сформулировать направления дальнейшего исследования, выработать предложения по совершенствованию системы правового регулирования отношений, связанных с внедрением беспилотных автомобилей, что может способствовать решению задач не только теоретического, но и практического характера, возникших в процессе внедрения в транспортную систему России полностью автоматизированных автомобилей.

Способствовать решению указанной задачи может применение риск-ориентированного подхода, основанного на программно-целевом подходе и получившего распространение в самых различных сферах общественной жизни, например, в проектной деятельности; финансовом обеспечении [13, с. 16; 14, с. 34]; бюджетировании и финансовой деятельности государства [15, с. 48–49]; бизнес-процессах [16, с. 39]; государственном управлении и государственном контроле (надзоре) [17, с. 54]; противодействии терроризму [18, с. 13] и коррупции [19, с. 52; 20, с. 50]; предупреждении распространения инфекционных заболеваний [1, с. 7; 21, с. 17; 22, с. 456; 23, с. 161] и т. д.

Понимание значимости проблем, связанных с типологизацией, визуализацией, мониторингом и последующим управлением рисками на транспорте, демонстрирует целый ряд российских и иностранных исследователей.

Так, вызывает обоснованный интерес классификация рисков и угроз информационной безопасности, возникающих в процессе использования беспилотных воздушных судов [5, с. 44], учитывающая актуальные вопросы обеспечения уголовно-правовой защиты в указанной сфере [24, с. 119]. При этом отмечается, что особое значение имеет решение вопроса об ответственности за внешнее вмешательство в процесс управления и функционирования автоматизированной системы вождения беспилотного автомобиля.

Предпринимаются заслуживающие внимания и поддержки попытки формирования концептуальной основы управления рисками на транспорте как особой разновидности управленческой деятельности, имеющей стадийный

и системный характер [16; 25, с. 34; 26, с. 19 и далее].

Рассматривается необходимость учёта вероятных рисков безопасного использования объектов транспорта в интересах внедрения контракта жизненного цикла в пассажирском комплексе дальнего следования [27, с. 88].

Специалистами особое внимание уделяется исследованию вопросов соблюдения норм гуманитарного права при применении различных беспилотных систем [28, с. 218; 8, с. 277], а также осуществлению мониторинга рисков их использования в различных условиях обстановки [29, с. 118; 3, с. 98].

Зарубежные специалисты активно исследуют риски, связанные с возрастанием затрат, вызванных перегруженностью дорог в связи с внедрением беспилотных автопарков, существенно влияющих на городскую мобильность [30], акцентируют особое внимание на проблемах, связанных с рисками для качественных городских пространств и активной мобильности населения, отмечая при этом, что несмотря на ожидаемое будущее внедрение беспилотных транспортных средств в городах, имеется крайне мало исследований, анализирующих проблемы, стоящие перед городским планированием [31].

Имеются представляющие интерес работы, посвящённые прогнозированию рисков дорожно-транспортных происшествий с учётом различных факторов, в том числе – включающих риски, связанные со всё более широким распространением беспилотных автомобилей, а также рассматривающие вопросы оценки риска несчастного случая на основе истории траекторий вождения, событий вождения и записей о воздействии [32].

Также небезосновательно отмечается необходимость разработки методологии оценки рисков дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей, подключённых и автоматизированных транспортных средств в целом. Зарубежные специалисты при этом предлагают исходить из того, что автоматизированные транспортные средства трансформируют автомобильный транспорт, и в рамках этой трансформации страховщики автотранспортных средств являются одними из ключевых заинтересованных сторон [33].

Анализ результатов впечатляющей исследовательской активности представителей различных научных направлений и школ, специалистов в области транспорта позволяет сделать вывод об актуальности и значимости проблемы, определившей цель исследования, а также опреде-

лить круг недостаточно изученных вопросов, что позволяет сформулировать исследовательские задачи и определиться в методологии исследования, сформулировать умозаключения и обосновать авторские выводы, реализация которых, по нашему мнению, может способствовать минимизации рисков безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств.

Цель исследования, важный этап которого изложен в статье, – выработка концептуальных предложений по совершенствованию системы правового регулирования управления рисками безопасного использования высокоавтоматизированных транспортных средств.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные гипотезы

Используя полученные ранее результаты, изложенные в научной литературе, авторы в процессе исследования исходили из гипотезы о том, что высокая степень социальной, экономической, оборонной значимости транспортной системы для России [17, с. 52], уязвимость элементов транспортного комплекса для актов незаконного вмешательства [34; 10, р. 71] жёстко детерминируют необходимость углублённой научной проработки источников происхождения и типологизации рисков, вероятных угроз безопасному функционированию транспорта [10, р. 74], выработки на этой основе системы правового регулирования транспортных отношений с использованием инструментария публично-правового регулирования.

Ранее авторами был также обоснован тезис [35; 29], согласно которому взаимосвязь между появлением инновационного транспорта и значимостью правового обеспечения процессов их внедрения и использования [36, с. 263], необходимость их правового урегулирования в интересах обеспечения безопасности на транспорте в целом [2, с. 46], минимизации рисков, связанных со всё более широким использованием транспортных средств [37, с. 4], в том числе, – оснащённых автоматизированной системой вождения [38, с. 29], следует признать имеющей закономерный характер и вполне научно обоснованной [35; 39].

При этом результаты системно-правового и формально-догматического анализа отечественных нормативных правовых актов и их проектов свидетельствуют о недостаточности мер, предпринимаемых в целях урегулирования возникающих при внедрении инновационной техники отношений [38, с. 91]. Также ранее нами обосновано утверждение о том, что нор-



моторческая деятельность в указанном направлении осуществляется с существенным опозданием и с недостаточной степенью системности [38, с. 94].

Важным для настоящего исследования является умозаключение о том, что необходимо использование потенциала законодательства о техническом регулировании, которое должно рассматриваться именно как правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции, производству, строительству, монтажу, наладке, эксплуатации и утилизации, а также в области применения на добровольной основе требований к указанным объектам и правового регулирования отношений в области оценки соответствия [34; 40, с. 35].

Авторы обосновывают необходимость и востребованность с точки зрения общественной практики, целесообразность и обоснованность в контексте правовой теории применения риск-ориентированного подхода в целях разработки мер правового характера в интересах обеспечения безопасности использования беспилотных автомобилей, в связи с чем в исследовании использован историко-правовой подход, инструментарий правовой герменевтики, методология формально-догматического и системного подходов.

Полученные в процессе исследовательской работы результаты позволяют с достаточной степенью достоверности утверждать, что высокая востребованность и потенциальная применимость риск-ориентированного подхода в самых разных областях общественной жизни вполне обоснована теоретически и фундирована потребностями практики, поскольку научно обоснованная и эффективно функционирующая система оценки и управления рисками в той или иной сфере позволяет своевременно выявить факторы риска и принять адекватные меры общей и частной превенции для их полного устранения либо, по меньшей мере, минимизации до приемлемого, допустимого для нормального функционирования системы уровня.

Доступные для изучения и представляющие собой вполне основательными результаты исторического, семантического, семиотического анализа, полученные многочисленными приверженцами теории принятия решений и теории игр, освобождают, по нашему мнению, авторов от необходимости подробного рассмотрения категории «риск», однородных и производных терминов и понятий, равно как и обозначаемых ими явлений в рамках герменевтики и гносеологии.

Вместе с тем следует иметь в виду, что именно выявление единого, совпадающего во всех концепциях риск-ориентированного подхода в различных сферах деятельности позволяет вычленивать типичные сущностные признаки исследуемого нами явления, имеющие принципиальное значение. Необходимость такого рода исследования видится в важности определения концептуальных подходов, на базисе которых предполагается формулировать правовые и организационные основы применения риск-ориентированного подхода в целях выявления степени (меры) угроз безопасности использования беспилотных автомобилей в интересах последующей выработки управленческого решения по их минимизации.

Риск-ориентированный подход к организации государственного контроля (надзора)

В рамках системно-правового исследования рисков безопасного использования высокоавтоматизированных (беспилотных) транспортных средств наиболее значимыми для сравнительного исследования в связи с возможной применимостью опыта являются, по нашему мнению, правовые основы риск-ориентированного подхода в ряде областей, к числу которых следует, в первую очередь, отнести законодательство о государственном контроле (надзоре).

При этом следует, естественно, учитывать, что задолго до осуществления риск-ориентированного подхода к организации государственного контроля и надзора система управления рисками использовалась в таможенном и налоговом контроле, однако, наиболее полно как принципиальные, так и процедурные аспекты применения указанного подхода нашли именно в законодательстве о государственном контроле (надзоре).

Вероятно, концепция риск-ориентированного подхода в государственном контроле (надзоре) может быть признана однородной для риск-ориентированного подхода в целях выявления степени (меры) угроз безопасности использования беспилотных автомобилей, чем обусловлено значение предлагаемых ниже результатов исследования системы правового регулирования контроля за соблюдением обязательных требований. В целях большей степени актуализации изложенного подхода применительно к предмету исследования анализ будет проведён с учётом специфики контрольной (надзорной) деятельности, осуществляемой в целях обеспечения транспортной безопасности.

Согласно п. 2 ст. 1 вступившего в силу с 1 июля 2021 года Федерального закона от 31 июля 2020 г. № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» (далее также – Закон о контроле) государственный контроль (надзор), муниципальный контроль должны быть направлены на достижение общественно значимых результатов, связанных с минимизацией риска причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям, вызванного нарушениями обязательных требований. Таким образом, анализ легализованного предназначения государственного контроля свидетельствует о том, что категория «риск» имеет сущностное, определяющее и цель, и способ осуществления контроля, значение.

Несмотря на установление общих условий внедрения системы управления рисками на законодательном уровне в положениях главы 5 Закона о контроле, правовое регулирование управления рисками на транспорте как разновидности управленческой деятельности имеет фрагментарный характер. Помимо того, отсутствует общая теоретико-правовая модель управления рисками на транспорте, которая послужила бы концептуальной основой построения систем на конкретных видах транспорта, соответствующих организации контрольной (надзорной) деятельности Ространснадзора с учетом его новых полномочий и существенным образом возросших количественно и изменившихся содержательно рисков обеспечения безопасности как в целом для транспортной системы России, так и на отдельных видах транспорта.

Правовые механизмы управления рисками для видов транспорта

Некоторые правовые механизмы управления рисками сформированы и внедрены на отдельных видах транспорта.

Так, на железнодорожном транспорте действует Межгосударственный стандарт ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»¹, в котором под управлением рисками понимается согласованная деятельность, направленная на управление и руководство предприятием в отношении рисков (п. 3.33). Процесс управления рисками включает следующие стадии: определение области применения; определение критерия риска; идентификацию риска; анализ частот; анализ последствий; определение уровня риска; оценивание риска; обра-

ботку риска; мониторинг и пересмотр риска (п. 5.1).

На воздушном транспорте действует ряд стандартов, в частности, Национальный стандарт ГОСТ Р 55846–2013 «Воздушный транспорт. Система менеджмента безопасности авиационной деятельности. Приемлемый риск. Принципы и методы определения приемлемого риска для государства и поставщиков обслуживания»². Управление риском на воздушном транспорте представляет собой процесс, аналогичный управлению безопасностью, в узкоспециализированном направлении обеспечения безопасности на основе измерения значимости рисков, снижения тяжести последствий от воздействия на систему факторов риска и уклонения системы от факторов риска (п. 3.1.9).

Также следует отметить, что основу различных концепций управления рисками составляют положения следующих ГОСТов: ГОСТ Р ИСО 31000-2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство», утвержденный приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 декабря 2010 г. № 883-ст; ГОСТ Р ИСО 31010–2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска», утвержденный приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 декабря 2011 г. № 680-ст; ГОСТ 33433-2015. Межгосударственный стандарт. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте, утвержденный приказом Росстандарта от 04.12.2015 № 2108-ст и пр. В то же время изучение локальных моделей управления рисками свидетельствует об отсутствии единого концептуального и категорийно-понятийного подхода в вопросе управления рисками на транспорте. В частности, в разработанных корпорациями концепциях³ используются такие понятия, как: фактор риска, риск-фактор, индикатор риска, показатель риска, опасности, источники рисков событий и т. д.

Сформулированная на железнодорожном транспорте концепция управления рисками имеет стадийный характер. Так, процесс управления рисками на железнодорожном транспорте состоит из следующих этапов: а) выявление

² Утвержден Приказом Росстандарта от 22 ноября 2013 г. № 1878-ст.

³ Распоряжение ОАО «РЖД» от 13.01.2020 № 18/р «Об утверждении Методики оценки критериев принятия решений при разработке мероприятий по случаям нарушения безопасности движения на основе анализа рисков в области безопасности движения и снижения тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах».

¹ Введен в действие Приказом Росстандарта от 04.12.2015 № 2108-ст.



рисков; б) анализ и оценка рисков; в) воздействие на выявленные риски; г) мониторинг и пересмотр; е) обмен информацией и консультирование (п. 2.10. МР).

При этом методика выявления рисков предполагает также и анализ причин (риск-факторы, источники) рисков события. Под риск-факторами понимаются внутренние или внешние факторы, которые отдельно или в комбинации с иными факторами могут привести к реализации риска. Кроме того, на этапе анализа и оценки рисков в целях дальнейшего мониторинга и пересмотра рисков владельцы рисков разрабатывают ключевые индикаторы для выявленных рисков (КИР) (п. 4.7.1. МР). КИР используются для обеспечения раннего оповещения о возрастающей вероятности реализации риска и принятия превентивных мероприятий по воздействию на риск или признания факта реализации риска и принятия мер по минимизации последствий. Они не являются описанием риска, а служат индикатором для рассмотрения необходимости изменения текущих мероприятий по воздействию на риск.

Возможности и цели применения риск-ориентированного подхода к управлению беспилотными транспортными средствами

В результате полученных данных считаем возможным утверждать, что использование получившего широкое распространение риск-ориентированного подхода представляется наиболее адекватным способом выявления степени (меры) угроз безопасности использования беспилотных автомобилей в целях последующей выработки правовых мер и принятия управленческого решения в интересах их минимизации.

Указанный подход позволяет осуществить мониторинг и визуализацию рисков, их дифференциацию, что является основой для разработки и последующей реализации мер, в том числе, публично-правового (административно-правового) и частно-правового (гражданско-правового) характера, направленных на предупреждение и устранение либо минимизацию до приемлемого уровня рисков и угроз безопасности использования беспилотных автомобилей в условиях мегаполиса.

Можно сделать вывод о том, что анализ основ минимизации рисков безопасного использования беспилотных автомобилей предполагает выделение совокупности принципов построения и функционирования системы управления указанными рисками.

Построение системы управления рисками, связанными с допуском к эксплуатации с последующим использованием беспилотных автомобилей, помимо имеющего общее значение принципа системности, в соответствии с которым управление указанной категорией рисков рассматривается как составляющая более сложных систем, имеющих видовое значение, должна обладать определенной структурой, свойством адаптивности, динамичности, устойчивости и т. д. Она должна строиться на основе специальных принципов, включающих принципы научности, всесторонности, объективности, конкретности (ситуативности) и др.

Краткий анализ требований частных принципов: дифференцированность и правовая определённость

Учёт принципа дифференцированности, по нашему мнению, предполагает необходимость типологизации рисков по степени их значимости для безопасности использования беспилотных автомобилей, выявления степени влияния соответствующих угроз на безопасность дорожного движения с участием беспилотных автомобилей. Выделение нами данного принципа обусловлено во многом особым его значением для решения вопросов, связанных с комплексным анализом факторов, влияющих на безопасность эксплуатации беспилотных автомобилей именно в мегаполисах.

Правовая определённость как принцип построения системы управления рисками, связанными с допуском к эксплуатации с последующим использованием беспилотных автомобилей, предполагает необходимость чёткого и достаточно строгих нормативного правового урегулирования всех возникающих при этом общественных отношений [11, с. 16; 12, с. 118;]. Речь идёт о необходимости однозначного закрепления в позитивном праве процедур выявления риск-факторов, возникающих в процессе допуска к эксплуатации беспилотных автомобилей, мониторинга рисков, ответственности за соответствующие правонарушения и т. д.

ВЫВОДЫ

Результаты проведённого исследования позволили подтвердить высокую степень практической применимости и полезности риск-ориентированного подхода в целях минимизации угроз, возникающих в процессе допуска к эксплуатации, эксплуатации беспилотных автомобилей.

Формированию новейшей концепции управления рисками на транспорте должна предшествовать работа по разработке общей теоретико-правовой модели управления рисками, возникающими в процессе допуска к эксплуатации, эксплуатации беспилотных автомобилей.

Критическое осмысление парадигмальных основ применения риск-ориентированного подхода в различных сферах общественного производства и социально-экономических отношений позволило определить систему и отчасти структуру, сформулировать принципы построения системы управления рисками, связанными с допуском к эксплуатации с последующим использованием беспилотных автомобилей.

Легализация в позитивном российском праве, практике деятельности органов управления транспортом и субъектов транспортных отношений предложений, сформулированных по результатам проведённого исследования, позволит за счет оптимизации системы управления рисками, комплексного использования правовых средств минимизировать риски эксплуатации беспилотных автомобилей на дорогах общего пользования, что имеет не только научное, но и прикладное значение для обеспечения эффективности и безопасности их функционирования, может способствовать инновационному развитию транспортной системы в контексте обеспечения развития российской экономики, достижения национальных целей и стратегического позиционирования Российской Федерации в современном мире.

Представленные в настоящей статье авторские выводы не претендуют на завершённость и окончательность, но, по нашему мнению, могут послужить основой как для научной дискуссии, так и для дальнейшего исследования проблем правового обеспечения безопасного использования беспилотных автомобилей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов С. О., Глебов И. Н., Чукин С. Г. [и др.] Право в точке бифуркации: обсуждение концептуального исследования военных проблем международного права (Дискуссия в формате «круглого стола» по материалам гл. 6 «Военные проблемы международного права» т. III монографии «Военное право») // Государство и право. – 2022. – № 12. – С. 59–67. DOI 10.31857/S1026945200233012.

2. Бажина М. А. Основные тенденции развития правового регулирования осуществления перевозок в условиях цифровизации // Юрист. – 2021. – № 11. – С. 44–50. DOI: 10.18572/1812-3929-2021-11-44-50.

3. Корякин В. М. Транспортное законодательство военного времени: постановка проблемы // Публично-правовые проблемы транспортного права: Материалы Пятого международного транспортно-правового форума / под ред. А. А. Чеботаревой, В. Е. Чеботарева, Л. М. Малёшиной. – М.: Изд-во Юридического института РУТ (МИИТ), 2023. – 326 с. – С. 96–106. EDN: QOZQPP.

4. Савенков А. Н. Глобальный кризис современности как предмет философии права // Государство и право. – 2019. – № 4. – С. 5–19. EDN: ZHEIRF.

5. Викснин И. И., Маликов С. В., Чучаев А. И. Безопасность беспилотных воздушных судов: информационные, функциональные и уголовно-правовые аспекты: монография / под ред. А. И. Чучаева. – М.: ООО «Юридическая фирма Контракт», 2022. – 240 с. ISBN 978-5-6047798-0-4.

6. Силицын С. А. Гражданское право в современных социально-экономических условиях // Журнал российского права. – 2021. – Т. 25. – № 1. – С. 8–15. DOI: 10.12737/jrl.2021.002.

7. Хабриева Т. Я. Право перед вызовами цифровой реальности // Журнал российского права. – 2018. – № 9 (261). – С. 5–16. DOI: 10.12737/art_2018_9_1.

8. Холиков И. В. Некоторые проблемные вопросы международно-правовой регламентации использования беспилотных морских систем в военных целях // Военное право. – 2019. – № 6 (58). – С. 276–282. EDN: WSJKKB.

9. Жданов К. В., Холиков И. В. Болезнь, вызываемая вирусом Эбола: от теории к практике // Журнал инфектологии. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 5–17. EDN TQQPRL.

10. Kharlamova Y., Pishchelko A., Zemlin, A. Problems of Realisation of Public Oversight in the Field of Transport Counterterrorism Policy. Kutafin University Law Review. 2020, Vol. 7, Iss. 1 (13), pp. 67–78. DOI 10.17803/2313–5395.2020.1.13.067–078. EDN: YSCBWQ.

11. Землин А. И. Проблемные вопросы правового обеспечения использования высокоавтоматизированных транспортных средств // Транспортное право. – 2022. – № 4. – С. 13–20. EDN: YNLWLS.

12. Землин А. И., Матвеева М. А., Гоц Е. В., Торшин А. А. Проблемные вопросы правового регулирования использования автомобилей с автоматизированной системой вождения // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 4 (101). – С. 117–122. EDN: QLAYCZ.

13. Землин А. И., Землина О. М., Денисова Ю. В. Актуальные организационно-правовые вопросы применения программно-целевого метода финансового обеспечения развития железнодорожного транспорта в России // Транспортное право и безопасность. – 2017. – № 12 (24). – С. 57–71. EDN: ZXMJEL.

14. Землина О. М., Мигачев А. Ю. Финансовый контроль как способ борьбы с коррупцией в сфере закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд // Организационно-правовые проблемы противодействия коррупции при осуществлении государственных и муниципальных закупок: сб. научных статей. Чехов, 2015. – С. 36–42. EDN: UDWRCZ.

15. Левшиц Д. Ю. Налоговое мошенничество в зарубежных странах // Налоги. – 2007. – № 6. – С. 15–17. EDN: IJQYVL.

16. Левушкин А. Н., Морозов С. Ю. Проверка контрагента перед заключением договора как непоименованный способ обеспечения исполнения предпринимательских обязательств // Юрист. – 2021. – № 7. – С. 37–42. DOI: 10.18572/1812-3929-2021-7-37-42.

17. Землин А. И., Пищелко А. В. Актуальные проблемы правового обеспечения транспортной безопасности // В сб.: Борьба с правонарушениями в сфере экономики: правовые, процессуальные и криминалистические аспекты. Сб. мат. междунаро. научно-практ. конференции в рамках международного юридического форума «Право и экономика: национальный опыт и стратегии развития». – 2019. – С. 51–54. EDN: UNADEK.

18. Землин А. И., Козлов В. В. Противодействие терроризму. Организационно-правовое обеспечение на транспорте: Учеб. пособие. – М.: Юрайт, 2020. Сер. 76 Высшее образование (1-е изд.). – 181 с. ISBN: 978–5–534–10013–6.



19. Bagreeva E. G., Ragulin A. V., Shamsunov S. K. Crimes in the sphere of business activity: trends of impact on business in the Russian Federation // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2019, Vol. 7, Iss. 3, pp. 531–536. EDN: ZNZZNA.
20. Холиков И. В. Реализация антикоррупционной политики в бизнес-сообществе: международно-правовые, социальные и гражданско-правовые аспекты // *Правовые и организационные проблемы противодействия коррупции в организациях с государственным участием* (на примере ОАО «Российские железные дороги»): Материалы Международной научно-практ. конференции, Москва, 26 сентября 2018 года. – М.: Юридический институт РУТ (МИИТ), 2018. – С. 48–55. EDN: SKDTEH.
21. Землин А. И. Некоторые аспекты обеспечения безопасности на транспорте в условиях распространения инфекционных заболеваний (на примере пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 // *Военное право*. – 2020. – № 6 (64). – С. 15–29. EDN: UIALYN.
22. Землин А. И., Матвеева М. А., Гоц Е. В., Торшин А. А. Противодействие распространению коронавирусной инфекции COVID-19 в мегаполисах с использованием беспилотных автомобилей: опыт, правовые и организационные аспекты // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. – 2022. – Т. 14. – № 6. – С. 455–483. EDN: VOMTKE.
23. Мельков С. А., Холиков И. В. Экономико-правовые составляющие безопасности жизнедеятельности населения в условиях распространения эпидемий, пандемий и массовых заболеваний // *ГосРег: государственное регулирование общественных отношений*. – 2020. – № 3 (33). – С. 159–172. EDN: KBRQTF.
24. Чучаев А. И., Маликов С. В. Ответственность за причинение ущерба высокоавтоматизированным транспортным средством: состояние и перспективы // *Актуальные проблемы российского права*. – 2019. – № 6 (103). – С. 117–124. DOI: 10.17803/1994-1471.2019.103.6.117-124.
25. Лещов Г. Ю. Современные аспекты формирования нормативно-правовой базы для создания инфраструктуры беспилотного транспорта // *Вестник евразийской науки*. – 2022. – Т. 14. – № 1. – Статья 18. EDN: MUGGWI.
26. Майоров В. И., Горюченко С. В., Костылев А. К. и др. Создание системы управления рисками в сфере обеспечения безопасности дорожного движения: Монография. – Челябинск: Циперо, 2018. – 131 с. ISBN 978-5-91283-994-8.
27. Землин А. И., Шинкарук А. С., Вишнякова Е. П. Правовые и технологические аспекты внедрения контракта жизненного цикла в пассажирском комплексе дальнего следования // *Мир транспорта*. – 2023. – Т. 21. – № 1 (104). – С. 87–90. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-1-10. EDN: ZSITGI.
28. Холиков И. В., Сазонова К. Л. Международно-правовая ответственность в контексте правовой регламентации военного использования беспилотных летательных аппаратов // *Военное право*. – 2017. – № 4 (44). – С. 217–226. EDN: ZFLYTF.
29. Корякин В. М. Обеспечение живучести транспортных систем в условиях специальной военной операции: правовой аспект // *Транспортное право и безопасность*. – 2023. – № 1(45). – С. 116–129. EDN: QKIZAI.
30. Boffa, F., Fedele, A., Iozzi, A. Congestion and incentives in the age of driverless fleets. *Journal of Urban Economics*. 2023, Vol. 137 (C), 103591. [Электронный ресурс]: <https://ideas.repec.org/a/eee/juecon/v137y2023ics009411902300061x.html>. Доступ 27.05.2023.
31. Gonzalez, E., Cordera, R., Stead, D., Nogues S. Envisioning the driverless city using backcasting and Q-methodology. *Cities*, 2023, Vol. 133, 104159. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275122005984>. Доступ 27.05.2023.
32. Brühwiler, L., Cheng Fu, Haosheng Huang, Longhi, L., Weibel, R. Predicting individuals car accident risk by trajectory, driving events, and geographical context. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, Vol. 93, 101760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101760>.
33. Kester, J. Insuring future automobility: A qualitative discussion of British and Dutch car insurer's responses to connected and automated vehicles. *Research in Transportation Business & Management*, 2022, Vol. 45, Part C, 100903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100903>.
34. Kholikov, I., Zemlin, A., Mamedova, I., Zemlina, O. Problems of Ensuring Security of Transport Infrastructure Facilities. IOP Publishing Ltd, «International Science and Technology Conference «Earth Science» – Chapter 3», 2021, 42002. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042002.
35. Землин А. И. Правовые средства обеспечения безопасности использования беспилотных автомобилей в мегаполисе. НИР: грант № 22–28–20334. Российский научный фонд. 2022. EDN: BSZDJV
36. Петров Ю. И., Землин А. И., Землина О. М. Зарождение системы управления путями сообщения и транспортного законодательства России в IX–XVIII веках // *Мир транспорта*. – 2019. – Т. 17. – № 3 (82). – С. 260–277. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-260-277.
37. Лукашевич С. В. Беспилотное транспортное средство: смена парадигмы как следствие цифровизации экономики // *Транспортное право*. – 2019. – № 3. – С. 3–5. EDN: CLIRDU.
38. Землин А. И., Матвеева М. А., Гоц Е. В., Торшин А. А. Актуальные проблемы правового регулирования отношений, возникающих в связи с использованием высокоавтоматизированных автомобилей: Монография. – М.: КноРус, 2022. – 172 с. ISBN: 978–5–406–11096–6.
39. Правовые средства обеспечения безопасности использования беспилотных автомобилей в мегаполисе. Отчет о НИР № 22–28–20334. Российский научный фонд. 2022. EDN: LMIFBF
40. Лещов Г. Ю., Борисова С. В. Саморегулирование в сфере транспортного образования как разновидность правового регулирования на транспорте // *Транспортное право и безопасность*. – 2022. – № 1 (41). – С. 33–42. EDN: AVPFHK.

Информация об авторах:

Землин Александр Игоревич – доктор юридических наук, кандидат философских наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, эксперт – научный руководитель Научно-исследовательского центра экспертиз на транспорте Российского университета транспорта, научный руководитель направления «Транспортная безопасность» Научно-экспертного совета Центра исследования проблем безопасности Российской академии наук, Москва, Россия, zemlin.aldr@yandex.ru.

Матвеева Мария Андреевна – кандидат юридических наук, доцент кафедры транспортного права Юридического института Российского университета транспорта, Москва, Россия, matveeva1987@mail.ru.

Гоц Евгения Валентиновна – старший преподаватель кафедры транспортного права Юридического института Российского университета транспорта, Москва, Россия, evgeniya.goc@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 18.06.2023, одобрена после рецензирования 17.07.2023, принята к публикации 20.07.2023.



ЛОГИСТИКА

124

Как переплелись история термина и история реальных процессов.



СЕВЕРНАЯ ТРАЕКТОРИЯ

133

Как 110 лет назад предполагали проложить оптимальный путь из Сибири к морским северным транзитным путям: экономическое, коммерческое и техническое обоснование. Заключительная часть публикации, начатой в предыдущем номере.



КОЛЕСО ИСТОРИИ





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 347.763

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-12>

Исследование онтологии логистики историко-генетическим методом



Валерий КУРГАНОВ



Михаил ГРЯЗНОВ



Алексей ДОРОФЕЕВ

Валерий Максимович Курганов¹, Михаил Владимирович Грязнов², Алексей Николаевич Дорофеев³

¹ Тверской государственный университет, Тверь, Россия.

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.

³ Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия.

✉ ¹ glavreds@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Цель исследования состоит в установлении происхождения и эволюции термина «логистика», понимаемой как управление материальными потоками и запасами. Использован историко-генетический метод и контент-анализ в изучении имеющихся источников.

Показана несостоятельность предположений о происхождении наименования «логистика» в современной трактовке из античной Греции и Византийской империи. Также отсутствует связь разрабатываемой Лейбницем математической логики с содержанием логистики в экономике и военном деле. Установлена неправомерность объяснения эволюции термина «логистика» случайными совпадениями слов, являющихся омонимами и относящихся к разным историческим эпохам и странам.

Подтверждён приоритет Г. В. Жомини в формулировке принципов логистики в его работах по военному искусству, написанных после эмиграции в Российскую империю. Благодаря распространению трудов Жомини в странах мира логистика стала развиваться в современном виде, первоначально в военной сфере, а затем в экономической деятельности.

Систематизированы причины, которые привели к интенсивному развитию логистики во время Второй мировой войны и в послевоенное время. Исследованы различия в приоритетах в эти периоды в странах мира. Выявлены две основные тенденции, одна из которых состояла в использовании конкурентных преимуществ логистики в рыночной среде, а другая – в обеспечении пространственной связности и транспортной доступности территорий.

Ключевые слова: логистика, терминология, онтология, историко-генетический метод.

Для цитирования: Курганов В. М., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н. Исследование онтологии логистики историко-генетическим методом // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 124–132. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-12>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Известно несколько десятков определений понятия «логистика», содержащихся в учебниках, учебных пособиях, монографиях и других публикациях. Такое расхождение в понимании, что такое «логистика», можно воспринимать как курьёз, так как организацией материальных потоков и хранением запасов люди занимаются, начиная с возникновения товарного производства, то есть со времён неолитической революции. Вместе с тем творческая активность авторов публикуемых материалов, считающих себя специалистами в логистике, имеет под собой объективное основание. Ведь мало кому приходит в голову составлять определения физики, астрономии или математики. Эти отрасли знаний уже сформировались.

Обилие определений говорит о том, что логистика, возникшая в начале развития цивилизации одновременно с появлением производящего хозяйства и торговых отношений, стала формироваться как наука относительно недавно. Начальный этап любой науки – это формирование её онтологии, терминологической базы. Традиционное понимание онтологии как области философии, исследующей общие категории и закономерности бытия, всё чаще дополняется конкретно-предметными аспектами в соответствующих областях науки. Онтология определяет предметную область исследования, основные понятия и связи между ними. В этом смысле онтология близка по своему значению к термину «тезаурус» [1].

Вместе с тем понятие «онтологии» может иметь более сложную многоуровневую иерархическую структуру. Согласно онтологии, понятия в выбранной сфере деятельности распределяются по группам, которые находятся между собой в горизонтальных и вертикальных связях. Характеризуются отношения и типы взаимодействия между понятиями. Исследование онтологии имеет значение для уточнения семантики (смыслового наполнения) той или иной области деятельности, способствует единообразному пониманию терминологии логистики и установлению взаимосвязей между терминами [2].

Цель исследования состоит в установлении происхождения и эволюции термина «логистика», понимаемой как управление материальными потоками.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Операционная деятельность в логистике и несостоятельность предположений о происхождении её названия из греческого языка

При формировании онтологии логистики одна из задач состоит в установлении происхождения самого названия этой сферы деятельности. В публикациях различных авторов одновременно могут предлагаться взаимоисключающие версии. Главное даже не в том, что эти версии взаимоисключающие и могут размещаться рядом, например, в одном учебнике или учебном пособии. Проблема в том, что приводимые в литературе сведения далеко не всегда имеют отношение к координации взаимодействия участников цепи поставок, движению материальных потоков, формированию запасов, складскому хранению и другим видам деятельности, которые принято связывать с логистикой в современном её понимании.

Одним из примеров такого подхода является поиск истоков термина «логистика» в греческом языке. В частности, его происхождение связывают с древнегреческим словом *λογιστική* [логистике] – «счётное искусство» [3]. В Афинах логистами называли выборных контролёров, осуществлявших финансовую проверку деятельности должностных лиц. Если выявлялись злоупотребления, то логисты готовили материалы к судебному рассмотрению [4]. После чтения трактата Аристотеля (384–322 годы до н. э.) [4], где упоминаются античные «аудиторы» и «дознаватели», становится ясно, что они не имели отношения к транспортировке, управлению запасами и выполнению других операций, связанных с товародвижением. Примерно так же нельзя говорить, что Норберт Винер (1894–1964), опубликовав свою знаменитую книгу «Кибернетика или управление и связь в животном и машине», посвятил её вопросам кораблевождения, так как греческое слово *κυβερνητική* [кибернетике] означает «искусство управления судном», «искусство кормчего».

Ценным историческим источником являются византийские литературные памятники. В частности, сочинение императора Константина VII Багрянородного (Порфирогенета) (905–959) «Об управлении империей» включает главу «О росах, отправляющихся с моносилами из России в Констан-



тинополь», в которой содержится первое документальное описание транспортного обеспечения международной торговли нашей страны с Восточной Римской империей [5].

В Византийской империи государственным языком был греческий. На нём, спустя тысячу лет после Аристотеля, написано сочинение византийского императора Льва VI (866–912) «О тактике» [6], которое тоже часто в современной литературе называют одним из источников появления термина «логистика» применительно к военной сфере. Действительно, император пишет о логистике, но имеет в виду решение кадровых и финансовых вопросов обеспечения армии, а не перемещение войск и воинского снаряжения. Обеспечивать движение византийской армии на марше, проверять состояние дорог и переправ должны были не «логисты», а антикенсоры (*ἀντικένσωρ*). В их функции входило также определение потребности в провианте и снаряжении для ведения боевых действий. Антикенсоры вместе с минсорами (*μίνσωρ*) или, в другом написании, минсураторами, организовывали размещение войск лагерем. Снабженческие функции возлагались на палликариев (*παλλικάριον* или *πάλλιξ*), служивших в обозе (*τοῦλδος* [тоулдос] или *τοῦλδον* [тоулдон]). Чтобы убедиться, что византийские «логисты» не занимались тем, что сегодня понимается под логистикой, в том числе применительно к военным вопросам, достаточно прочесть труд Льва VI [6].

Довольно часто в литературе по логистике упоминают, что великий математик и философ Готфрид Вильгельм Лейбниц (1646–1716) использовал слово «логистика» для названия математической логики – разрабатываемого им нового направления в науке. В чём смысл упоминания Лейбница в современной литературе по логистике – неясно, так как очевидно, что сложившееся в настоящее время содержание логистики никак не связано с математической (говоря по-другому, символической или формальной) логикой. Может быть, некоторые авторы предполагают, что указание имени учёного-энциклопедиста, создавшего независимо от Ньютона дифференциальное и интегральное исчисление, придаст современной логистике больший авторитет?

Дополнительно можно отметить, что труды Лейбница по математической логике при его жизни не публиковались и были практически неизвестны. Логические исчисления были созданы спустя почти полторы сотни лет после смерти Лейбница, и начало работ в этом направлении связывают с выходом в свет в 1847 г. статьи Джорджа Буля (1815–1964) «Математический анализ логики» [7]. Д. Буль, узнав, что Г. Лейбниц предвосхитил его открытия, почувствовал, «как будто Лейбниц пришёл и пожал ему руку через столетия» [7]. Это делает честь английскому математику, но не имеет отношения к логистике, как она трактуется сейчас.

Точно также не имеет отношения к логистике как управлению материальными потоками то обстоятельство, что в 1904 г. по предложению участников философского конгресса в Женеве (один из предложивших был выходцем из России) за математической логикой было закреплено название, использовавшееся в рукописях Лейбница, – «логистика» [8]. Этот факт попал в советскую «Философскую энциклопедию», вышедшую в 1960–1970 гг., и с тех пор вот уже более полувека воспроизводится оттуда в различных изданиях [8]. В настоящее время, если посмотреть литературу по математической логике [9; 10], то можно увидеть, что применительно к ней термин «логистика» практически никогда не используется. Так что события женевского конгресса 1904 г. могут представлять интерес для изучения истории философской мысли, но не для понимания эволюции логистики как сферы экономической деятельности.

Если бы авторы современных публикаций по логистике в поисках происхождения этого термина углубились в античную философию, то они могли бы, опираясь на авторитет Аристотеля, предложить ещё одну версию. Античный философ создал систему дедуктивных умозаключений, которую назвал силлогистикой (от греч. *συλλογίζομαι* – рассчитываю, считаю) [10–12]. К счастью, пока ещё логистику, как организацию товародвижения, не связывают с силлогистикой.

Также пока нет попыток связать происхождение термина «логистика» с полученным в 1838 г. бельгийским математиком Пьером Франсуа Ферхюльстом (1804–1849)

логистическим уравнением, которое нашло применение для моделирования численности населения, описания экономической динамики, в экологии и в других областях [13; 14]. Учитывая универсальный характер логистического уравнения и популярности описываемой им логистической кривой (сигмоиды, сигмовидной кривой, S-образной кривой), надо отдать должное сдержанности авторов публикаций о логистике.

Заканчивая обсуждение отсутствия связей происхождения термина «логистика» с городским самоуправлением Афин за триста лет до нашей эры, византийской армией Раннего Средневековья, созданием основ математической логики на рубеже XVII–XVIII вв. и философским конгрессом в начале XX в., уместно привести один из законов логики, как его сформулировал Аристотель – автор этого закона: «Значить не одно – ничего не значить. А если имена лишены значений, то невозможно друг с другом вести разговор, а по правде и с самим собой... Итак, как мы и говорили в начале, имя что-то значит и значит что-то одно» [15, С. 89–90].

Попытки объяснить термин «логистика» случайными совпадениями слов, имеющих различный смысл и относящихся к разным историческим эпохам, являются бесплодными. В различных языках присутствуют омонимы – слова, одинаковые по написанию, но разные по значению. Например, в русском языке есть слово «карьер» в значении «каменоломня» (перешло от французского *carrière*) и есть слово «карьер» в значении «галоп лошади» (имеет в основе итальянское *carro* в значении «колесница», «повозка» и образованное от него итальянское *carriera* – «быстрый бег лошади»).

Чтобы установить происхождение понятия «логистика», надо найти, когда оно стало, по выражению Аристотеля, «значить» то же, что и сейчас, то есть когда его содержание стало близким к современному пониманию и стало означать координацию действий всех сторон, участвующих в организации материальных потоков; выполнение транспортных операций; хранение и распределение запасов и другие связанные с этим операции. Причём под материальными потоками надо понимать не только движение различных грузов, но также и перемещение людей.

Роль Г. В. Жомини в создании логистики как современной науки

Возникновение логистики как науки связано с именем Генриха Вениаминовича Жомини (1779–1869). Поскольку Жомини был профессиональным военным, то он разрабатывал логистику как одну из составляющих военного искусства, в котором особо выделил стратегию, тактику и логистику [16, с. 29–30; 134; 140–141]. Не больше и не меньше: по его мнению, чтобы победить в боевых действиях, нужно владеть стратегией, тактикой и логистикой. Логистику Жомини определял как практическое искусство двигать армии, детальную организацию маршей, устройство лагерей, размещение войск на квартирах, – всё это обеспечивает достижение стратегических и тактических целей [16, С. 140–141]. После трудов Жомини термин «логистика» стал в своём современном значении употребляться сначала в военном деле, а потом и для обозначения соответствующей области экономической деятельности.

Создатель науки о военной логистике, из которой потом выросла современная гражданская логистика, заслуживает хотя бы нескольких слов для описания его жизненного пути. В литературе Жомини нередко называют французским военным теоретиком. Удивительно, но иногда в отечественных изданиях можно встретить даже англоязычное написание его фамилии – «Джомини».

В действительности Антуан-Анри Жомини (Antoine-Henri Jomini, таким было его имя при рождении) родился в состоятельной швейцарской семье. В Швейцарии поступил на военную службу. Вскоре, будучи совсем молодым человеком, он написал двухтомный труд, название которого не может не впечатлять даже в кратком воспроизведении: *Traité des grandes opérations militaires...* («Трактат о больших военных действиях...»). Желая его издать, он добился в 1804 г. аудиенции у французского маршала Нея. Тот выделил необходимые средства и пригласил юного швейцарца к себе на службу. Так началась его карьера в Наполеоновской армии. Трактат Жомини, впоследствии дополненный, неоднократно переиздавался, в том числе в России, Британии, Америке [17].

В 1813 г. произошёл конфликт 34-летнего Жомини, уже имевшего с 1811 г. звание бригадного генерала, с начальником штаба французской армии маршалом Бертье.



В итоге он решил эмигрировать в Россию, где ему присвоили чин генерал-лейтенанта. Имя Генрих Вениаминович он принял, перейдя в православие, и на протяжении 56 лет оставался российским подданным, вплоть до своей кончины. Живя в России, труды он продолжал писать по-французски, поскольку русский язык так и не выучил. В этом не было необходимости, поскольку в российском высшем обществе французский язык был общеупотребителен. Тем не менее, его труды переводились и издавались на русском языке. Самой значительной работой является «Краткое начертание военного искусства», написанная в 1837 г. первоначально «для наставления августейшего лица» [16, с. 1] (наследника престола Александра Николаевича, будущего императора Александра II). В 1840 г., через 27 лет после эмиграции Жомини в Россию, она была издана на русском языке [16]. Книга постоянно дополнялась и существенно перерабатывалась автором, приобретая популярность в различных странах. В 1939 г. под названием «Очерки военного искусства» она была издана наркоматом обороны СССР (перевод с оригинала 1855 г. на французском языке) [18]. Именно во втором томе этой книги и содержится наиболее полное и точное изложение представлений Жомини о военной логистике, которой посвящена глава VI «О логистике, или о практическом искусстве приводить армии в движение». В XXI веке книга Генриха Вениаминовича Жомини не забыта и продолжает переиздаваться [19].

Говоря о развитии логистики в нашей стране в XIX веке, уместно вспомнить, что её название было включено В. И. Далем (1801–1872) в его знаменитый «Толковый словарь» (в пояснении к статье «Логика»): «Логистика... часть тактики, о передвижении войск» [20, С. 262]. Зная о дружбе и постоянном общении В. И. Даля и А. С. Пушкина, можно предположить, что в творческом наследии великого поэта когда-нибудь отыщется и термин «логистика».

Жомини не преувеличивал и не преуменьшал свой вклад в логистику. Он отмечал, что первое систематическое описание военной логистики («первый опыт о логистике») дал Жак-Франсуа де Шастене, маркиз де Пюисегюр (1656–1743) [16, С. 2], автор трактата «Искусство войны», который

был издан уже после его смерти в 1749 г.

При «Короле-Солнце», Людовике XIV, Пюисегюр занимал должность *maréchal général des logis*, что переводится на русский язык примерно как «главный маршал квартир». В публикациях по французской военной истории отмечается, что со второй половины XVI века в функции этого военачальника входила организация маршей армии, организация и возведение лагеря, снабжение провиантом и боеприпасами. Приблизительно так понимаются в армиях других стран функции начальника штаба. Как только главнокомандующий определял конечный пункт назначения армии, главный маршал квартир (*maréchal général des logis*) проводил рекогносцировку местности, изучал состояние дорог и переправ, определял места устройства лагерей и размещения состава армии на квартиры, порядок обеспечения провиантом и боеприпасами, составлял карты, после чего разрабатывал маршевые приказы – подробные маршруты движения для каждой колонны. Ошибки могли привести к проигрышу военной кампании [21].

Сконцентрировать превосходящие силы на самом важном направлении в нужное место и в нужное время, обеспечив решающий перевес над противником, – таков принцип победы всех выдающихся полководцев: Александра Македонского, Ганнибала, Цезаря, Румянцева, Наполеона, Суворова, Кутузова. Справедливо также обратное: стратегические просчёты в логистике приводят, в конце концов, к военному поражению. По этой причине Ганнибал 15 лет побеждал римлян в Италии, но был вынужден эвакуировать оттуда свои войска. Через две тысячи лет после Ганнибала невозможность логистического обеспечения армии Наполеона привела, в совокупности с другими факторами, к её полному уничтожению в России. Наполеон бросил остатки своих войск и бежал в Париж. К слову сказать, морозы в 1812 году начались тогда, когда французская армия практически уже перестала существовать. Народная память сохранила слова М. И. Кутузова в обращении к войскам: «Война окончена за полным истреблением неприятеля».

Опираясь на опыт предшественников, Жомини писал: «Слово «логистика», как известно, происходит от *Major general des*

logis (по-немецки переводимого «квартирмейстер»), то есть от названия той категории офицеров, обязанность которых когда-то состояла в расположении войск по квартирам или в лагерях, в направлении колонн и в расположении их на месте. Этим и ограничивалась вся логистика, которая всё же, как видим, включала в себя устройство обычных лагерей. Но после того как установился новый способ войны без лагерей, движения стали более сложными, а потому и штабы получили также более широкие права и обязанности... прежняя старая логистика уже не является более достаточной для обозначения науки штабов... ей нужно придать другое развитие и сделать из неё новую науку» [18].

Заслуга Жомини состоит в том, что его книга даёт ясный и однозначный ответ на вопрос о происхождении термина «логистика».

Термин «логистика» в современном понимании происходит от французского слова *le logis* – жилище. Этот термин связан с необходимостью обеспечить жильем армию при её перемещениях во время маршей. Постепенно содержание логистики расширилось, и она стала, говоря словами Жомини, «новой наукой» [18].

Во французском языке есть и другие слова с этим же корнем и близкими значениями, например, *loge* – ложа, комната, камера, помещение; *le logement* – жильё, квартира. В немецкий язык из французского попало слово *das logis* – жилище [22, С. 54]. В немецком языке есть также слова *logieren* – (временно) жить; квартировать; поселять; устраивать на жительство; *das lager* – склад, лагерь, хранилище, магазин. Существуют однокоренные слова аналогичного значения в русском языке и других славянских языках: логово, логовище, берлога, лог, лежбище, ложе, лежать. Можно предположить, что корень «лог» или «*log*» характеризует этимологические связи слов в языках индоевропейской семьи (в частности, французском, немецком, русском и других языках этой семьи) со значениями «жилище» (как для людей, так и для животных), «место расположения», «помещение» и т. д. Можно предположить, что подобное происхождение имеет также латинское слово *locus* (место).

Термин «логистика» появился во французской армии со второй половины XVI века, задолго до Жомини, для обозначения организации перемещений войск, их разме-

щения на квартирах и в лагерях, поставок продовольствия и военного снаряжения. Непреходящее значение труда Жомини состоит также в том, что он сформулировал задачи «новой» логистики, коренным образом отличающейся от «старой» логистики, от прежних представлений о её содержании. Чрезвычайно важно, что все эти задачи очень легко интерпретируются применительно к экономической деятельности в гражданской сфере [23, С. 16–17], хотя сам он, как профессиональный военный, вероятнее всего, об этом не задумывался.

Доктор истории, адъюнкт-профессор истории Университета штата Флорида (США), Эммануил М. Вовси (Eman Vovsi), детально рассмотревший деятельность Г. В. Жомини в нескольких научных работах, приводит сведения, что его ««принципы военного искусства» ... заложили основу для профессионального военного образования в России, а также в странах Европы и Северной Америки XIX–XX вв.» [17]. После Жомини логистика приобрела своё современное значение, сначала в военной области ведущих стран мира, а затем в гражданской сфере.

Распространение логистических технологий из военной сферы в экономику после Второй мировой войны

Решение логистических задач в военной сфере наиболее важно для стран, вынужденных обеспечивать и координировать боевые действия на удалённых и обширных территориях. Во время Второй мировой войны такая необходимость особенно острой была у Германии и Японии, с одной стороны, и у отражающих их агрессию Советского Союза и США, с другой стороны.

Германия и Советский Союз на протяжении почти четырёх лет вели друг против друга, в основном, наземные операции на линии огромной протяжённости с привлечением многочисленных армейских формирований, нуждающихся в продовольствии и снаряжении, в боеприпасах и военной технике. Требовалось создание запасов и транспортное обеспечение. Необходимо было эффективное управление логистикой, организация взаимодействия фронта и тыла.

В начальный период войны Советский Союз успешно осуществил беспрецедентную по масштабам и срокам логистическую



операцию эвакуации более полутора тысяч промышленных предприятий в Поволжье, на Урал, в Сибирь и союзные республики Средней Азии.

США должны были решать задачи морской военной логистики в войне с Японией в Юго-Восточной Азии и в Тихом океане, а также создавать условия для ведения боевых действий на суше в Европе и Северной Африке. Сложные логистические задачи программы ленд-лиза США решали совместно с СССР и Великобританией. Из Западного полушария поставки в Советский Союз осуществлялись по тихоокеанскому маршруту (через Владивосток, далее по Транссибу), через порты Персидского залива и наземную транспортную сеть Ирана, далее судами Каспийской военной флотилии, а также через Мурманск арктическими конвоями, через Аляску и Черное море.

Одной из крупнейших логистических операций американо-британских вооруженных сил стало десантирование в Нормандии (1944 г., операция «Оверлорд»).

На протяжении всей войны у Америки была постоянная задача обеспечивать эффективную морскую и наземную логистику на театрах боевых действий, расположенных на значительном удалении от своей территории.

Сложные логистические задачи после Второй мировой войны стояли перед США во время оккупации Германии и Японии, а также в конфликтах в Корее (1950–1953), во время Ливанского кризиса (1958), во время войны во Вьетнаме (1955–1975) и в других районах земного шара.

Практически сразу после войны стала создаваться сеть американских военных баз, которая в настоящее время насчитывает более тысячи объектов в 150 странах [24]. Их инфраструктура разрастается и требует постоянного логистического сопровождения с территории США.

Непрерывное усложнение задач военной логистики привело к необходимости использования армией США научного потенциала университетов, исследовательских центров и консалтинговых компаний. Военная логистика начала проникать в гражданскую сферу, а наработки в координации материальных потоков, управлении запасами, выборе оптимальных транспортных связей стали в 1950/60-х годах использоваться не только армией, но также и в бизнесе для совершен-

ствования снабжения, организации производства и сбыта готовой продукции, для перехода от решения частных задач к комплексному управлению движением товаров от поставщиков до конечных потребителей.

Вместе с логистическими технологиями координации транспортных и складских операций, интегрированного управления материальными потоками распространялась соответствующая терминология. Стала издаваться литература по логистике. Одной из первых публикаций была статья Роя Олдерсона «Эффективность маркетинга и принцип отложенной поставки» [25].

Появились профессиональные объединения, одной из задач которых стала разработка глоссариев и унификация терминологии. В 1963 г. был создан Национальный совет проблем управления физическим распределением (National Council of Physical Distribution Management), реорганизованный в 1985 г. в Совет логистического менеджмента (Council of Logistics Management – CLM). С 2004 г. он опять сменил название и в настоящее время функционирует как Совет профессионалов в области управления цепями поставок (Council of Supply Chain Management Professionals – CSCMP) [26].

Процесс взаимодействия бизнеса и армии в США был двусторонним. Например, предприниматель Малком Маклин (1913–2001) в 1954 г. создал первую мультимодальную схему перевозок в контейнерах современного типа. А бурное развитие применения контейнеров произошло, когда возникла необходимость обеспечивать военные действия американской армии во Вьетнаме, и Маклин получил крупный заказ на выполнение транспортировки от военного ведомства США. Довольно скоро эта технология распространилась по миру и получила название «контейнерной революции».

Приобретению компетенций и навыков в логистике способствовали также большие размеры территории США и открытый выход в Тихий и Атлантический океаны с множеством незамерзающих портов на протяженной береговой линии.

Период 1950–60-х гг. характерен не только активизацией взаимодействия в США армии, науки и бизнеса в области логистики. В это время начала меняться экономика.

Америка стала одной из самых богатых стран мира. В ней проживало 6 % населения

планеты, а производилось и потреблялось 66 % всех выпускаемых в мире товаров. Стандартом средней американской семьи с несколькими детьми стало наличие благоустроенного дома в пригороде, владение двумя или более автомобилями, возможность приобретать различные товары и пользоваться разнообразными услугами. Строились удобные автомобильные дороги. Появлялись и интенсивно расширялись розничные сети с крупными торговыми центрами, одним из примеров которых стал основанный в 1962 г. Walmart [27].

Это означало не только рост благосостояния граждан США. Для жителей загородных домов в значительно большей степени, чем для живущих в квартирах, характерен повышенный спрос на автомобили, бытовую технику, мебель. Они покупают инструменты для домашнего использования, средства для ухода за газонами и цветниками, мелкого ремонта и т. п. Поэтому увеличение строительства индивидуальных домов приводит к расширению торговли и потребности в доставке разнообразных товаров на все объекты товаропроводящей сети, вплоть до конечных потребителей.

Конкуренция в бизнесе стала смещаться в область борьбы за покупателя, повысилось ассортиментное предложение товаров, распространялось послепродажное обслуживание. Стали увеличиваться запасы, расти издержки на продвижение товаров к покупателям, возникла необходимость совершенствования логистики. Для решения управленческих задач стали использоваться экономико-математические методы и вычислительная техника. Логистика стала необходимой в конкурентной борьбе предприятий в рыночной среде сначала в США, а потом во всём мире.

ВЫВОДЫ

1. Анализ первоисточников, касающихся городского самоуправления в Афинах IV века до н. э. и византийской армии рубежа IX–X веков, установил, что предположения о греческом происхождении наименования логистики, понимаемой как организация материальных потоков и управление товарными запасами, неосновательны.

2. Термин «логистика» стал складываться первоначально во французской армии в XVI–XVII вв. и был связан с комплексным решением задач передвижения войск: организацией маршей и лагерей, обеспечением

войск жильём, снабжением продовольствием, боеприпасами и воинским снаряжением. Должность руководителя службы генерального штаба, занимавшегося этими задачами, называлась *maréchal général des logis*, что переводится на русский язык как «главный маршал квартир» (от французского слова *le logis* – жилище).

3. Принципы военной логистики в современном понимании впервые были сформулированы Г. В. Жомини в одной из глав книги «Краткое начертание военного искусства», написанной после его эмиграции в Россию, изданной на русском языке в 1840 г. и первоначально предназначавшейся для обучения основам военного дела наследника престола, будущего императора Александра II. Впоследствии книга неоднократно переиздавалась и оказалась востребованной в профессиональном военном образовании не только в России, но и в странах Европы и Северной Америки.

4. Активное развитие военная логистика получила во время Второй мировой войны, когда велись боевые действия практически во всех регионах земного шара. Особое значение военная логистика имела для США в связи с необходимостью обеспечивать боеспособность своих вооружённых сил в Юго-Восточной Азии, Тихом океане, в Европе, Северной Африке и осуществлять поставки по программе ленд-лиза.

5. После Второй мировой войны военная логистика в США продолжала интенсивно развиваться в связи с военными действиями их вооружённых сил в разных регионах планеты, оккупацией Германии и Японии, созданием обширной сети военных баз в 150 странах мира. Привлечение научно-исследовательских организаций для совершенствования военной логистики стало приводить к распространению её принципов из военной сферы в экономику. Осуществлялся также обратный процесс, когда разработки бизнеса в области логистики использовались армией США.

6. Рост благосостояния населения и бурное развитие экономики привели к тому, что в конкурентной борьбе предприятий акцент сместился в сторону логистики сначала в США, а потом в других странах мира. Стали создаваться профессиональные объединения и публиковаться литература по логистике и управлению цепями поставок.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаренко Е. Н., Комарова Л. Н., Нечаева И. В. Новый словарь иностранных слов. – М.: Азбуковник, 2008. – 1040 с. ISBN 5-93786-034-9.
2. Добров Б. В., Иванов В. В., Лукашевич Н. В., Соловьёв В. Д. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения: Учебное пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 173 с. ISBN 978-5-9963-0007-5.
3. Древнегреческо-русский словарь. [Электронный ресурс]: <https://translate.academic.ru/λογιστική/el/ru>. Доступ 25.02.2023.
4. Аристотель. Афинская полития. 2-е изд. // Перевод и примечания проф. С. И. Радцига. – М.: Госуд. соц.-эконом. изд-во. – 1937. – 131 с.
5. Константин Багрянородный. Об управлении империей. – М.: Наука, 1991. – 268 с. ISBN 5-02-008637-1 (в пер.).
6. Лев VI Мудрый. Тактика Льва / Изд. подготовил В. В. Кучма; отв. ред. Н. Д. Барабанов. – СПб.: Алетей, 2012. – 368 с. – (Серия «Византийская библиотека. Источники»). ISBN 978-5-91419-747-3.
7. Peckhaus, V. Leibniz's Influence on 19th Century Logic. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2018 Edition), Edward N. Zalta (ed.). [Электронный ресурс]: <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/leibniz-logic-influence>. Доступ 25.02.2023.
8. Артём-Александров К. В. О втором и третьем мировых философских конгрессах // Вестник Русской христианской гуманитарной академии. – 2015. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 187–192. [Электронный ресурс]: http://vestnik.rhga.ru/archive/Vestnik_2015_01.pdf. Доступ 25.02.2023.
9. Алябьева В. Г. Математическая логика. Формальная логика: Учебное пособие. – Пермь, 2021. – 109 с. ISBN 978-5-7944-3611-2.
10. Зюзьков В. М. Математическая логика и теория алгоритмов: Учебное пособие. – Томск: Эль Контент, 2015. – 236 с. ISBN 978-5-4332-0197-2.
11. Чанышев А. Н. Аристотель. – М.: Мысль, 1987. – 221 с.
12. Асмус В. Ф. Античная философия. – М.: Высш. школа, 1998. – 400 с. ISBN 5-06-003049-0.
13. Verhulst Pierre François. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspondence Mathématique et Physique (Bruxelles), 1838, T. 10, pp. 113–121. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/article/10.1007/bf02309004>.
14. Московкин В. М., Журавка А. В. Пьер-Франсуа Ферхульст – забытый первооткрыватель закона логистического роста и один из основателей экономической динамики // Оригинальные исследования (ОРИС). – 2020. – № 7. – С. 207–218. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/343769532_Moskovkin_V_M_Per_Fransua_Ferhulst_-_zabytyj_pervootkryvatel_zakona_logisticskogo_rosta_i_odin_iz_osnovatelej_ekonomiceskoj_dinamiki_VM_Moskovkin_AV_Zuravka_Originalnye_issledovania_nauc-prakt_elektr. Доступ 25.02.2023.
15. Аристотель. Метафизика // Пер. с древнегр. – Вступ. статья и комм. А. В. Маркова. – М.: Рипол-Классик, 2018. – 384 с. ISBN 978-5-386-10325-5.
16. Жомини Г. В. Краткое начертание военного искусства или новый аналитический обзор главных соображений стратегии, высшей тактики и военной политики. – Ч. 1. – СПб.: Тип. путей сообщений и публичных зданий, 1840. – 408 с.
17. Вовси М. Э. От Аустерлица до Тильзита: военная и литературная деятельность Антуана-Анри Жомини в 1805–1807 гг. [Электронный ресурс]: <http://www.reenactor.ru/ARH/PDF/Eman.pdf>. Доступ 25.02.2023.
18. Жомини Г. В. Очерки военного искусства / Пер. с франц. [изд. 1855 г. Антикварное издание]. В 2-х т. – М.: Гос. воен. изд-во Наркомата обороны СССР, 1939. ISBN 978-5-0000-0000-0.
19. Жомини Г. В. Очерки военного искусства / Пер. с фр. – М.: Либроком, 2021. – 432 с. ISBN 978-5-397-07563-3.
20. Даль В. И. Толковый словарь живого великорусского языка. – Репринтное воспроизведение издания 1881 г. – М. О. Вольфа. – Т. 2. – И-О. – СПб.: Диамант, 1996. – 784 с. ISBN 5-300-01627-6.
21. Свистунов А. Победа любит усердие. [Электронный ресурс]: <https://warspot.ru/13350-pobeda-lyubit-userdie>. Доступ 25.02.2023.
22. Большой немецко-русский словарь. – В 2 т. // Авт.-сост. Е. И. Леппинг, Н. И. Филичева, М. Я. Цвиллинг; под общ. ред. О. И. Москальской. – 12-е изд. испр. – М.: Рус. яз.-Медиа; Дрофа, 2010. – 1004 с. ISBN 978-5-9576-0502-7.
23. Григорьев М. Н., Уваров С. А. Логистика. Базовый курс. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2022. – 818 с. ISBN 978-5-9916-2731-3.
24. Vine, D. The Pentagon's New Generation of Secret Military Bases. [Электронный ресурс]: <https://web.archive.org/web/20201122054053/https://www.motherjones.com/politics/2012/07/pentagon-new-generation-military-bases-tom-dispatch>. Доступ 25.02.2023.
25. Alderson, W. Marketing efficiency and the principle of postponement. Cost and Profit Outlook, 1950, Vol. 3, No. 4, pp. 15–18.
26. Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). [Электронный ресурс]: <https://cscmp.org>. Доступ 25.02.2023.
27. США в 1950-х годах – послевоенный расцвет государства. [Электронный ресурс]: <https://usa-24.ru/ssha-v-1950-x-godax-poslevoennyj-rascvet-gosudarstva>. Доступ 25.02.2023. ●

Информация об авторах:

Курганов Валерий Максимович – доктор технических наук, профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента Тверского государственного университета, Тверь, Россия, glavreds@gmail.com.

Грязнов Михаил Владимирович – доктор технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия, gt-autolab@mail.ru.

Дорофеев Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры финансовых технологий Финансового университета при Правительстве РФ, Москва, Россия, andorofeev@fa.ru.

Статья поступила в редакцию 26.04.2023, одобрена после рецензирования 14.06.2023, принята к публикации 18.06.2023.



Северный Сибирский торговый путь и Полярно-Уральская железная дорога. Часть 2



Пресс-архив

Продолжение публикации (начало см. в № 2 (105)).

Статья, опубликованная в журнале «Железнодорожное дело» в 1912 году, посвящена проекту строительства железнодорожной линии, связывающей речную сеть Сибири (примерно, от нынешнего Салехарда на Оби) с Арктическим побережьем в районе Варандея, где предполагалось строить морской порт.

Вне зависимости от того, что развитие транспортной инфраструктуры Заполярного Урала и Севера Европейской части России пошло в итоге другим путём, изменилась экономическая география, внешнеторговый баланс, статья интересна в историческом аспекте сложившимся уже более 110 лет назад сбалансированным и выверенным подходом к всесторонней оценке комплексных транспортных проектов и их технико-экономического обоснования. Авторы рассматриваемого проекта учитывали при аргументации множество факторов – стратегического характера (развитие Сибирского региона, снижение транспортной нагрузки на опорную транспортную сеть Европейской части страны, минимизацию конкуренции между отечественными производителями на пути прохождения товаропотоков), внешнеторговые потоки, сезонность навигации по рекам и Северному морскому пути, технические и экономические аспекты строительства, распределение частных и государственных инвестиций, прогнозируемые оптимальные тарифы и налогообложение, сроки окупаемости с учётом выплаты дивидендов и многие другие.

Конечно, содержание учитываемых факторов и методики оценки с тех пор существенно изменились. Одним из парадоксов является то, что несмотря на новые технологии, современные инженеры уже значительно выше оценивают риски и сложности строительства в приполярной зоне, которую в начале прошлого века считали чуть ли не лёгким и удешевлённым вариантом для строительства железной дороги.

В целом же надо отдать должное авторам за комплексность их подходов с учётом времени, когда они были сделаны.

При воспроизведении публикации максимально сохранены стиль, пунктуация и лексика того времени.

Ключевые слова: транспорт, история транспорта, инфраструктурный проект, приполярный Урал, Арктическая зона.

Для цитирования: Северный Сибирский торговый путь и Полярно-Уральская железная дорога. Часть 2 // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 133–144. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-13>.

Благодарность: редакция выражает признательность сотрудникам библиотеки Российского университета транспорта за помощь в подготовке материала.

Текст архивной статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The text of the archival article in English is published in the second part of the issue.

Район влияния и грузы его. На основании весьма богатого, но, к сожалению, разбросанного статистического материала о производительных силах Западной Сибири, могут быть сделаны следующие выводы: ежегодный избыток главнейших местных продуктов за последние годы составлял¹:

I. Пшеницы, ржи, ячменя и овса:

а) в Томской губернии от 8 300 000 до 20 200 000 пуд

б) «Тобольской губ. « 10 700 000 « 23 000 000 «

в) «Акмолинской обл. « 2 000 000 « 11 800 000 «

г) «Семипалатинск « 2 000 000 « 11 800 000 «

Всего от 21 000 000 до 55 000 000 пуд.

Ср. чис. – « 38 000 000 пуд².

II. Льна, пеньки и кудели.....500 000 «

III. Льняного семени 700 000 «

IV. Масла коровьего..... 2 000 000 «

V. Живого скота (до 200 т. голов)1 600 000 «

VI. Сала и свинины..... 800 000 «

VII. Шерсти, кожи и пушнины550 000 «

VIII. Мяса соленого и мороженого и дичи.2 800 000 «

IX. Рыбы в разном виде..... 300 000 «

X. Прессованного сена.....2 000 000 «

XI. Руд, металлов и каменного угля?

XII. Прочих товаров 1 000 000 «

Итого в год (кроме ст. XI) не менее..... 50 250 000 пуд.

Кр. ч.....50 000 000»³

Очевидно, что из указанного количества сибирского сырья немало оно будет вывозиться и впредь на Урал и далее – к Архангельску и на запад по существующим путям сообщения. Не подлежит также сомнению, что некоторые грузы будут продолжать направляться из

Западной Сибири в Восточную. Принимая, однако, в соображение обширные пространства плодороднейшей черноземной почвы в пределах Западной и Центральной Сибири, к обработке коей приступлено лишь в последнее время, с развитием переселенчества, а также и то обстоятельство, что увеличение производительности края находится в прямой зависимости от спроса и удобства вывоза соответственных продуктов к местам назначения, нет сомнения, что главная часть поименованных выше товаров будет тяготеть к европейским рынкам, избрав себе путем вывоза самый удобный и дешёвый, т.е. рассматриваемый Северный сибирский торговый путь.

Основательность подобного предположения подтверждается следующим расчетом.

Местные цены в Западной Сибири, напр., на пшеницу колеблются в настоящее время от 35 до 45 коп. за пуд, средняя же цена пуда пшеницы в Лондоне⁴ составляла в последние годы, кр.ч. 107 коп. Нет сомнения, что, с открытием обеспеченного пути сбыта произведениям Западной Сибири в Европу, сибирское сырье вздорожает, в виду чего разница стоимости той же сибирской пшеницы в местах производства и потребления будет не 107–40=67 коп., а, быть может, всего 50 коп. Стоимость же провоза одного пуда пшеницы по рассматриваемому пути, включительно с накладными расходами, составит:

1) водою от ст. «Обь» до ст. «Собь», 2 400 в. вниз по течению...» 7,00 коп.⁵

2) по Полярно-Уральской ж. дороге от ст. «Собь» до морского порта «Варандей» (400 вер.), со стоимостью перегрузок и прочих расходов... 12,00 коп.⁶

¹ По данным Сибирского отдела Имп. Геогр. Общества, проверенным и пополненным Е. А. Жернаковым и И. И. Игнатовым. Весьма ценные указания приведены также в ист. очерке: «Сибирская ж. дорога в её прошлом, и настоящем», сост. С. Саблером и И. Сосновским, под гл. ред. ст.-секр. Куломзина. СПб., 1903 г., стр. 402–415, и в статье В. Григорьева: «Что нам может дать Туркестано-Сибирская ж. дорога». Вестник пут. сообщ. 1905 г.; №№ 25 и 26.

² Это количество ежегодного запаса сибирского хлеба подтверждается также донесениями местных губернаторов и начальников областей за последние десять лет (с 1894 по 1904 г.).

³ С добавлением же руд, металлов и каменного угля – свыше 80 млн пуд. Ср. отсчеты грузового движения Сибирской ж. дороги.

⁴ Нижеприводимые выводы применимы и к большинству остальных рынков.

⁵ По заявлению тюменских пароходоладельцев.

⁶ А именно:

а) собственно стоимость провоза $400 \times \frac{1}{45} =$ кр.ч. 9,00 коп.

б) дополнительные железнодорожные сборы, заменяемые для Полярно-Уральской ж.д. общим «экспедиционным сбором» в 1,50 коп.

в) за пропуск зерна через два элеватора..... 1,50 коп. Всего ... 12,00 коп.

- 3) портовые расходы..3,50 коп.⁷.
 4) за провоз зерна морем от Мединского порта до Лондона, с расходами страхования..10,00 коп.⁸.

Всего..... 32,50 коп.,
 а потому разница в ценах пшеницы, при вывозе её по Северному сибирскому пути, даст на пуд еще свободный (полезный) запас в 50–32,50=17,50 коп.⁹.

В параллель к сему, провоз хлеба в зерне от ст. «Обь» до Лондона, через главные порты Европейской России обходится:

С пуда в копейках:

через а именно:	Арх.	Спб.	Ревель	Рига	Либава
1. Провозная плата по ж.д. ¹	35,26	54,88	57,43	57,81	59,29
2. Фрахты реч- ные и морские.	13,50 ²	6,00	6,00	5,00	4,50
3. Накладные расходы ³	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23
Всего	54,99	67,11	69,66	69,04	70,02

Здесь уместно заметить, что на суще-
 ствующих ж. дорогах дополнительные
 железнодорожные сборы составляют для
 хлебных грузов – 1,23 коп. с пуда (в т. ч
 соб. станционные расходы – 0,50 коп.; за
 нагрузку и выгрузку – 0,33 коп. за взве-
 шивание – 0,20 коп. и за сбор в $\frac{1}{5}$ коп. –

⁷ Для Полярно-Уральской ж дороги, упирающейся, с одной стороны, в морской порт (Варандей), а с другой – в речную гавань (ст. «Собь»), снабжаемые необходимыми гидротехническими сооружения и оборудования, – как составные части дороги – на средства частного общества, попутный сбор предлагается установить на 0,50 коп. выше, чем в прочих портах, т.е. в размере от 0,75 коп. до 1,50 коп., или в среднем, – по одной коп. со всех грузов, проходящих через оба конечные пункта дороги; что же касается собственно корабельного сбора, то таковой может составить на круг, приблизительно, 2,50 коп. с пуда, а потому полный портовый сбор для будущего Мединского порта выразится 3,50 коп. Такой размер общего портового сбора не может считаться преувеличенным, если принять во внимание значительные расходы, с которыми будет связано устройство, содержание, ремонт и постепенное развитие речной гавани и морского порта с их принадлежностями (эстакадами, кранами, пароходами, ледоколами и пр.), а также погашение необходимых на то денежных средств.

⁸ Применительно к состоявшемуся с голландским Торговым Домом «William Ch. Miller & C^o» соглашению, на основании коего означенный тариф установлен для всех морских транспортов между Архангельском, с одной стороны, и Роттердамом, Амстердамом, Антверпеном, Бременом, Гамбургом, Лондоном, Гуллем, Ньюкестлем и Лейтом – с другой.

⁹ В действительности означенная разница должна оказаться еще большей, так как провоз зерна по ж.. дорогам в среднем виде таксировался ниже, чем по 1/45 коп. с пуда и версты.

0,20 коп., всего – 1,23 коп.), а для прочих товаров – соответственно их классификации – от 0,97 до 1,48 коп. за пуд. Но так как рассматриваемая дорога будет находиться в исключительных условиях, требующих возможного упрощения её грузовых операций и расчетов, то означенные ставки предположено заменить одним общим экспедиционным сбором, в 1,50 коп. с пуда для грузов хлебных и в 1,75 коп. для остальных грузов.

Прибавляя к этим ставкам 107–50=57 коп., соответствующих принятой выше ср. цены сибирской пшеницы на ст. «Обь», стоимость её на Лондонском рынке получили бы всего... 111.99–124,11–126,66–126,04–127,02, т.е. она была бы выше существовавших там за последние годы средних цен на коп. 4,99 | 17,11| 19,06| 19,04| 20,02.

Этими выводами объясняется, между прочим, отчего сибирский хлеб, при вывозе его за границу даже по самому кратчайшему из существующих транзитных путей, через Челябинск, Котлас и Архангельск, поступает на рынки Западной Европы в сравнительно ограниченном количестве (всего от 1 $\frac{1}{2}$ до 3 млн пуд. в год) и, притом только тогда, когда закупная цена его на месте производства не превышает 46 до 48 копеек¹⁰.

Выше не было упомянуто об экспорте сибирского леса потому, что до сих пор он фактически не существовал. Не подлежит однако сомнению, что, с открытием удобного и дешёвого пути сбыта его за границу, он может составить одну из важнейших статей вывозной торговли Сибири.

На основании исследований, произведённых в 1898–1903 годах Самаровским лесничим А. А. Дунин-Горкавичем о состоянии казённых лесов в северной части Тобольской губернии¹¹, а равно по данным, приводимым инженером путей сообщения С. А. Жбиковским в его брошюре «Обь-Енисейский водный путь и его экономическое значение»¹², лесные площади Сибири в бассейнах Оби и Енисея до того обширны,

¹⁰ При этих ценах на проценты на оборотный капитал и на барыши остается всего от 6 до 4 коп. с пуда.

¹¹ Известия М-ва. Земледелия. 1903 г. № 41.

¹² «Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий». Вып. II. 1903 г.



что не находят себе подходящего сравнения даже с Канадой¹³. Принимая в расчет лишь самые близкие к рассматриваемому рельсовому пути лесонасаждения Березовского и Сургутского уездов Тобольской губернии, годичный отпуск из них леса, толщ, от 9 до 12 верш, на высоте груди, может быть определён в 1 700 000 шт. бревен¹⁴, или в обделанном виде, кр. ч в 51 млн куб. фут. (310 000 станд.), весящих столько же пудов.

Стоимость вырубки, подвозки и доставки леса по Оби и её притокам до ст. «Собь», со включением накладных расходов, составит на круг, около 4,75 руб. с бревна, а с распиловкой и обделкой – 6,10 руб. т.е., с куб. фута или пуда – 6,10:30=20 коп., тогда как провоз пуда поделок до заграничных портов, со всеми дополнительными расходами, обойдется не дороже 40 коп. Таким образом, стоимость сибирского леса, в обделанном виде, на рынках Англии, Франции и Германии не превысит с куб. фута 60 коп., между тем, как нынешние цены на лесные товары колеблются там между 76 и 115 коп¹⁵. С другой стороны, так как постройка дороги потребует около 3½ лет, то, уже до окончания её, на ст. «Собь» может быть доставлено значительное количество леса¹⁶, который, в виду усиливающегося на него спроса за границей, с первого же года открытия по дороге правильного движения будет иметь возможность направиться к местам сбыта.

¹³ Площадь обследованных в настоящее время лесных зарослей Тобольской губ. исчисляется в 16 520 000 дес., а таковая четырех уездов Енисейской губ., составляющих лишь 1/10 часть всей губернии, – в 8 мил. дес. Принимая же в соображение высказываемые по сему предмету замечания инж. С. А. Жбиковского, равно как указания А. А. Радцинга в его книге: «Лес и лесное хозяйство», 1901 г., есть основание предполагать, что лесные пространства Енисейской губ. составляют свыше 100 мил. дес. По разным соображениям, основанным на подсчетах, мы останавливаемся на следующих цифрах: чистых лесных посадений в Тобольской губ. 20 000 000 дес.

« » Томской « 11 200 000 »

« » Енисейской « 32 800 000 »
всего ...64 000 000 »

¹⁴ См. А. А. Дунин-Горкавич. «Тобольский Север». 1904 г.

¹⁵ См. С. А. Жбиковский. «Обь-Енисейский водный путь». Стр. 35.

¹⁶ Здесь, кстати заметить, что отпуск лесных материалов за границу из Архангельского порта составляет: в 1862 г 184 000 станд.

в 1900 г. 1 240 000 станд.

« 1890 « 366.000 »

« 1905 « 1.590.000 ».

Остается присовокупить, что включенные в вышеприведенную цену 4,75 руб. попенные [плата в казну за число срубленных деревьев, «пней» – прим. редакции] деньги составляют, в среднем, не менее 1,15 руб. на дерево, а по-сему очевидно, что с осуществлением Полярно-Уральской ж. дороги, доходы государства с казенных лесов могут принять небывалые размеры.

На основании приведенных данных позволительно предположить, что, с отстройкой рассматриваемой железной дороги и с установлением правильного пароходного сообщения по Оби, из вышеуказанного общего количества сибирских грузов (50 млн пуд., кроме леса и металлов) к вывозу в Европейскую Россию и за границу, через Варандейский порт, в первые же годы эксплуатации будет поступать не менее 50 %, т.е. до 25 млн, а вместе с лесными товарами и металлами – от 55 до 70 млн пудов.

Что касается ввозных в Сибирь товаров, то, по отношению к рассматриваемому сообщению, точных выводов пока сделать нельзя, но дабы осветить, насколько возможно, и эту сторону будущей деятельности Северного торгового пути, приводим нижеследующие соображения.

До сооружения великой Сибирской ж. дороги ввозные в Сибирь из Европейской России грузы, включительно с заграничными, направлялись большею частью на Нижний-Новгород, затем по Волге и Каме в Пермь, а оттуда по Пермь-тюменской ж. дороге в Ирбит (на ярмарку) и далее, по системам рек Иртыша и Оби, или же по старому сибирскому тракту, внутрь края. Но с 1897 года, по открытию движения на Средне-Сибирском участке, указанный ввозный путь через Пермь постепенно остается в стороне, служа ныне лишь для перевозки громоздких предметов и такого рода товаров и изделий, кои не требуют срочной доставки к местам назначения. В виду сего, для выяснения будущего положения сибирского импорта, сначала следует сделать сравнение тарифных ставок, установленных для сибирской магистрали, с провозными платами, которые будут иметь место для Северного торгового пути. Для большей ясности и упрощения расчётов, в нижепомещаемой таблице приведены итоги расходов лишь по трем самым выгодным (кратчайшим) направлениям рассматриваемых путей, между С.-Петербургом и Москвой, с одной стороны,

и станциями «Обь» и Иркутск, – с другой¹⁷. Кроме того, с целью облегчения разных коммерческих комбинаций, стоимость провоза импортируемых в Сибирь товаров определена по классам тарифного их разграничения, введенного в действие 1-го января 1901 г. (Изд. пятое).

Таблица провозных плат с пуда в копейках¹⁸ [приводится для иллюстрации].

Из настоящего сопоставления провозных плат не трудно вывести заключение о значении Северного торгового пути для сибирского импорта. Приняв к тому во внимание, что, кроме некоторых мануфактурных товаров и ткацких изделий, сахара и сахарного песка, бакалеи, табака (махорки), свечей, керосина и нефтяных остатков, цемента и некоторых других материалов, большинство потребных для Сибири товаров доставляется туда уже ныне из-за границы, через С.-Петербург, Москву и Челябинск, и что ввоз сей (а вместе с тем и вывоз) для грузов первых восьми классов до 11 коп. с пуда будет обходиться дешевле при направлении его через Варандейский порт¹⁹, станет еще понятнее то преобладающее влия-

ние, какое должно оказать осуществление Полярно-Уральской ж. дороги на развитие не только Западной и Центральной Сибири, но и прилегающих к ним областей.

Вызвав в данном случае благотворную конкуренцию во внешней торговле Сибири, указанное влияние выразится, прежде всего, удешевлением предметов первой необходимости для местного населения и в том числе земледельческих орудий и машин, без которых немислим будущий успех сельского хозяйства, а вместе с тем и культурное развитие страны.

Но не в этом только будет заключаться задача проектируемого пути: не в меньшей мере он послужит к пробуждению и развитию производительных сил нашего Севера как со стороны Европейской России, так и со стороны Западной Сибири. В этом отношении облегчение и удешевление, при посредстве сего пути, ввоза необходимейших вспомогательных снарядов и приспособлений для разработки нетронутых пока богатств царств растительного и ископаемого²⁰ и для упорядочения звериного и рыбного промыслов – сразу оживит весь полярный Север, что, в свою очередь, отразится также на увеличении импорта.

На основании данных, заимствованных из эксплуатационных отчетов Сибирской ж. дороги²¹, количество ввозимых в Сибирь, по сему пути, товаров достигло в 1902 г. 18 млн пуд²²; но ввиду того, что размер ввоза прямо пропорционален покупательной способности края, которая, как известно, зависит главным образом от более или менее облегченного и обеспеченного сбыта местных сельскохозяйственных произведений (хлеба и продуктов скотоводства) можно надеяться, что с открытием по Полярно-Уральской ж. дороге правильного движения и во внимании к изложенным выше соображениям, количество ежегодного, по означенному

¹⁷ А именно, по линиям: 1) С.-Петербург–Москва–Пенза–Рузаевка–Челябинск–ст. «Обь» и Иркутск; 2) Москва–С.-Петербург–Варандейский порт–ст. «Собь» и ст. «Обь»; 3) от С.-Петербурга и Москвы, через Варандей до ст. «Собь», затем по Оби и Чулыму до Ачинска и далее по Средне-сибирской ж. дороге, через Красноярск до Иркутска.

¹⁸ При этом приняты в расчёт следующие отдельные ставки:

а. за провоз товаров по жж. дорогам – ныне действующие тарифные платы, соответственно протяжению линий;
б. дополнительные сборы – по 1,23 коп. с пуда, за каждый непрерывный путь следования груза по жж. дорогам, за исключением Полярно-Уральской, для которой означенные расходы заменяются общим «экспедиционным сбором» в 1,75 коп. с пуда, для всех грузов, кроме хлебных (см. пр. 2 в № 33 «Жел.-дор. дела» с.г. на стр. 195);
в. морской фрахт от С.-Петербурга до Варандейского порта – 10 коп., а ручные фрахты: от ст. «Собь», вверх по Оби до ст. «Обь» – 8 коп.; от той же ст. «Собь» до Томска – 9 коп., а до Ачинска – 10 коп.; наконец,
г. общий портовый расход для рейсов между С.-Петербургом и Варандейским портом, в среднем, – 4 коп.

¹⁹ Разница в стоимости провоза ввозимых в Сибирь товаров на деле будет несравненно большая, если принять во внимание те косвенные расходы, с которыми сопряжено грузовое движение по длинным железнодорожным линиям. Не говоря уже о частых и продолжительных застоях вагонов, присущих перевозкам по таким линиям, в сопровождении с нередкою порчею товара, главные причины увеличения стоимости провоза заключаются в том, что сроки доставок становятся крайне неопределенными, вследствие чего не только возрастают проценты на затраченный капитал, но и сами торговые комбинации подвергаются большим переменам.

²⁰ Леса и лесных подблоск; металлов и руд (рассыпного золота, серебра, меди, свинца, марганцовых и железных руд и пр.); графита; каменного угля нефти и пр.; См. А. А. Дунин-Горкавич «Тобольский Север». 1904 г.; Н. Подревский. «О поездке на Северный Урал летом 1892 г.» (По дневникам Сыромятникова и Андреева); и В. С. Реутовский. «Полезные ископаемые Сибири». СПб., 1905 г.

²¹ Стат. М-ва П. С. Вып. 84, 1904 г., таб. III, стр. 33.

²² Начиная с 2,5 млн пуд. в 1897 году – времени открытия по дороге движения.



пути, ввоза составит в первые же годы эксплуатации – не менее 6 000 000 пудов²³.

Подводя итог всему вышеизложенному, грузовые обороты дороги получим в следующем виде:

1. По вывозу сибирских продуктов. Всех вывозных, в ближайшее время, грузов имелось в виду, от 65 до 70 млн пуд. в год. Такая цифра, однако, как показывает опыт на других дорогах, может быть достигнута лишь по прошествии 4–5 лет, тогда как с первого года открытия движения вывоз будет по всей вероятности меньший. В виду сего, в расчет вводится пока только 24 000 000 пудов²⁴.

2. По ввозу товаров и изделий. Количество ввозимых грузов установлено выше в столь умеренном размере, что нет основания к предположению, что оно не будет иметь места в первый же год эксплуатации.

Таким образом, по обоим направлениям движения в расчет принимается всего 30 000 000 пуд. грузов²⁵.

Условия её осуществления. Переходя к разбору экономической стороны предприятия и к результатам, которых можно

ожидать от эксплуатации Полярно-Уральской ж. дороги, следует сначала коснуться условий, с которыми связано её осуществление.

Проектируемая железная дорога резко будет выделяться из ряда существующих рельсовых сообщений, не только вследствие её географического положения, но и потому, что условия её эксплуатации во многом будут совершенно иные, чем прочих ж.д.

Выше была дана общая характеристика её значения, а также влияния, которое она должна оказать на обширный район Западной Сибири с прилегающими областями: Семипалатинской и Акмолинской и Березовским округом Тобольской губернии, причём указывалось и на то, что миссия её, как звена выдающегося транзитного пути, будет тесно связана не только с нуждами и требованиями постоянно возрастающего населения Сибири в центральных её частях, но и заданиями мировой торговли. Что же касается собственно её местного значения, то в этом отношении она будет находиться в совершенно исключительном положении, так как по ней не предвидится ни внутреннего товарного, ни обязательного (ежедневного) пассажирского движения. Такое отличительное свойство, однако, не послужит ей в ущерб; напротив того, являясь в данном случае естественным последствием бытового характера полярных стран, оно доставит проектируемому пути высокие преимущества перед другими рельсовыми сообщениями. Эти преимущества будут заключаться:

1) В отношении самого сооружения дороги:

а) в сравнительной дешевизне экономии её постройки (53 тр. на вер.), так как для неё не потребуются вообще возведения пассажирских зданий, со всею разнообразною их обстановкой, а на промежуточных станциях – ни товарных платформ, пакгаузов и прочих сооружений, вызываемых местным движением, – ни длинных запасных путей (за исключением одного разъездного на каждом остановочном пункте), ни, наконец, – сложных сигнальных приспособлений;

б) в сокращении числа промежуточных станций и разъездов, а также – подвижного

²³ Весьма интересные данные о будущей внешней торговли Сибири приводит в Русско-английском Горном Вестнике за 1900 год Н. Г. Гудсон, путешествовавший по Сибири в качестве представителя компании «Ермак».

²⁴ К сему количеству вывоза следовало бы приравнять и провозную способность дороги, т.е. число провозных стоил, подвижного состава и мастерских. Принимая, однако, во внимание, что приток на дорогу грузов может быстро возрасти, провозоспособность её рассчитана на 40 мил. пуд. в год в одном направлении.

²⁵ Доказательством того, что цифра сия не может считаться преувеличенной и, наоборот, скорее ниже вероятной нормы, могут служить след. официальные статистические данные о движении грузов по Сибирской ж. дороге: Перевезено всего, из них хлеб, гр.

в 1897 г. кр 21 078 000 пуд. 13 739 000 пуд.

« 1898 « ... 37 027 000 « 19 825 000 пуд.

« 1899 « ... 40 004 000 « 18 735 000 пуд.

« 1900 « ... 42 841 000 « 17 452 000 пуд.

« 1901 « ... 50 590 000 « 20 972 000 пуд.

« 1902 « ... 63 379 000 « 23 504 000 пуд.

« 1903 « ... 64 293 000 « 19 587 000 пуд.

« 1904 « ... 65 221 000 « 24 583 000 пуд.

Еще рельефнее рисуется рост грузового (транзитного) движения по линии Рыбинск-Псков. Линия эта соединяет как известно, р. Волгу с Балтийским морем (Ригой), каковая прямая связь до 1897 года, т.е. до отстройки участка Бологое-Псков, не существовала. С означенного же года, общее количество грузов, прошедших транзитом между Рыбинском и Псковом, выражается в следующих цифрах, заимствованных из годовых отчётов правления:

в 1897 г. кр, всего 418 000 пуд.

« 1898 « ... 13 920 000 пуд.

« 1899 « ... 16 415 010 пуд.

« 1900 « ... 21 087 000 пуд.

состава, который будет состоять преимущественно из товарных вагонов и паровозов новейшего типа²⁶.

2) В отношении эксплуатации:

а) в упрощении таковой, сведением станционных манипуляций и числа служащих до крайнего (разумного) минимума;

б) в сокращении времени стоянок поездов на станциях и разъездах, что, в свою очередь, ускорит кругооборот поездов и, следовательно, поведет к более рациональному использованию подвижного состава;

в) в увеличении доходности дор., выделением из эксплуатации малопродуктивных, если не убыточных в большинстве случаев, статей: правильного пассажирского и местного товарного движения; наконец,

г) в совершеннейшей утилизации [эффективным использованием – прим. ред.] самого пути, провозом грузов по всей его длине в 400 вер., как в одну, так и в обратную сторону.

Как усматривается далее из проектных данных, сооружение Полярно-Уральской ж. дороги по направлению, для неё ныне наметенному, а именно: от впадения р. Соби в Большую Обь, через т.н. Елецкий водораздел, до Варандейского порта, не будет связано с какими-либо особыми затруднениями; предельные её склоны не будут превышать 0,008, при наименьшем радиусе закругления кривых в 300 саж.; самая линия будет пролегать, большей частью, по ровным полярным тундрам, представляющим превосходное, в строительном отношении, и вполне надежное основание для возведения полотна дороги; искусственных и прочих линейных сооружений сравнительно немного; наконец, цены на строительные материалы вообще умеренные. С приданием же верхнему строению пути крайне солидной конструкции (с рельсами вес. 24 фун. в п. фута и со скреплениями новейшего американского типа «continuous joint»), 2000 поперечинами на версту путей и с применением балласта из щебня, толщ. слоя в 0,22 саж.), вышеоговоренные преимущества получают ещё большее значение и отразятся несомненно выгодно на всем экономическом строе рассматриваемого рельсового сообщения.

²⁶ Так, вагоны товарные предположены с грузоподъемной силой в 37 т. = 2296 пуд. и тарю в 17 т. = 1055 пуд., а всего в груз. сост. 54 т. = 3350 пуд., вследствие чего число их сравнительно ограниченное.

С другой стороны, проектируемая ж. дорога потребует целого ряда добавочных сооружений и обзаведений, вызываемых как её географическим положением, так и условиями её будущей эксплуатации. К сим сооружениям и обзаведением относятся:

1. Причалы и разные перегрузочные приспособления при концевых станциях у морского коммерческого порта и речной гавани, а также разные, входящие в состав оных механизмы; пароходы, баржи, лодки и прочие принадлежности порта и гавани; наконец, необходимый для местных рабочих артелей инвентарь и пр.

2. Элеваторы на концевых станциях, со всеми относящимися к ним приспособлениями для высушки, очистки и сортировки, а также – скорейшей перегрузки хлебных и разных семенных продуктов.

3. Устройство двух электрических станций как для приведения в действие механических приводов элеваторов, кранов и пр., так равно и для освещения конечных станций и поселков, снабжения энергией электрических трамваев и для других потребностей.

4. Устройство проволочного и беспроводного телеграфов, в связи с телефонными сообщениями между Варандейским портом и с. Усть-Цыльмой, на Печоре²⁷, и ст. «Собь» и с. Самаровском (при устье Иртыша)²⁸ с целью соединения проектируемой дороги с сетью русских и заграничных телеграфных линий, равно как для упорядочения речного судоходства вдоль Оби.

5. Постройка двух посёлков в оконечных пунктах дороги, как для надобностей местной администрации и её разнородных учреждений, так и для удобного размещения служащих и рабочих, не только железнодорожных, но и таковых будущей таможни и других ведомств и разных, причастных к делу, лиц.

Наконец, к добавочным принадлежностям рассматриваемого торгового пути должно причислить также возведение самого Варандейского коммерческого порта и Собской речной гавани. Сии сооружения, как не относящиеся непосредственно к железнодорожно-

²⁷ Отсюда пролегает почтовый тракт через Пинегу к Архангельску, вдоль которого с 1895 г. Усть-Цыльма соединена телеграфным проводом с общей сетью Империи и с заграничною.

²⁸ Этот пункт соединен уже ныне с Тобольском и, посему принадлежит также к общей телеграфной сети.



№ по пор.	Ка. тарифа.	До: через: От:	ст. «Обь».			ст. «Иркутск».		
			Батрак Челяб.	Вар. п. «Собь».	Разни- ца.	Батрак Челяб.	Вар. п. «Собь».	Разни- ца.
1	I	С.-Петербурга	195,31	62,93	132,38	262,63	160,49	102,14
2		Москвы.	179,96	114,27	65,69	234,02	211,83	22,19
3	II	С.-Петербурга	182,69	56,86	125,83	262,63	138,80	123,83
4		Москвы.	158,86	99,64	59,22	234,02	181,58	52,44
5	III	С.-Петербурга	152,49	50,78	101,71	219,10	116,98	102,12
6		Москвы.	136,90	85,01	51,95	195,26	150,81	44,45
7	IV	С.-Петербурга	126,20	46,48	79,72	164,70	103,33	61,37
8		Москвы.	115,96	75,30	40,66	146,82	131,05	15,77
9	V	С.-Петербурга	100,02	41,42	58,60	132,05	84,10	47,95
10		Москвы.	92,34	62,81	29,53	117,75	105,49	12,26
11	VI	С.-Петербурга	92,08	38,13	53,95	132,05	72,97	59,08
12		Москвы.	77,76	55,24	22,52	117,75	90,08	27,67
13	VII	С.-Петербурга	76,98	36,11	40,87	110,29	65,72	44,57
14		Москвы.	65,04	50,27	14,77	98,37	79,98	18,39
15	VIII	С.-Петербурга	69,43	34,84	34,59	99,41	61,81	37,60
16		Москвы.	58,69	47,68	11,01	88,68	74,68	14,00
17	IX	С.-Петербурга	61,88	33,83	28,05	88,57	58,22	30,35
18		Москвы.	52,33	45,23	7,10	78,99	69,63	9,36
19	X	С.-Петербурга	61,22	31,96	29,26	88,57	52,53	36,04
20		Москвы.	51,77	41,25	10,52	78,14	62,82	15,32
21	XI	С.-Петербурга	53,25	31,13	22,12	76,09	50,29	25,80
22		Москвы.	45,07	39,18	5,89	67,92	58,33	9,59
23	XII	С.-Петербурга	40,31	29,78	10,53	57,44	45,02	12,42
24		Москвы.	34,17	35,82	-1,65	51,31	51,06	0,25

му предприятию, в связи с постройкой будущей таможни и со всеми прочими принадлежностями порта и гавани, не вводятся в расценочную ведомость стоимости сооружения ж. дороги, но имеют составить предмет особого с правительством соглашения.

Результаты расценочной ведомости. На основании расценочной ведомости, потребный собственно для сооружения Полярно-Уральской ж. дороги строительный капитал определяется в 21 200 000 руб., что составит на версту – 53 000 руб.

К сему добавляется:

1. на разные станционные разгрузочные приспособления, на приобретение инвентарного имущества порта и гавани и на устройство речных пристаней – 3 000 000 руб.

2. на устройство элеваторов – 4 000 000 руб.

3. тоже – электрических станций – 800 000 руб.

4. тоже – телеграфных и телефонных сообщений между концевыми станциями, Усть-Цыльмой и с. Самаровским – 500 000 руб.

5. на устройство двух поселков – 2 800 000 руб.

Всего 11 100 000 руб.

6. оборотный капитал – 500 000 руб.

7. на уплату процентов и погашение капитала по облигациям в продолжение 3½ лет сооружения дороги – 2 700 000 руб.

8. расходы по вчинению предприятия и реализации строительного капитала и про-

центы на акции во время производства работ – 4 500 000 руб.

Всего – 40 000 000 руб.

или на версту дороги – 100 000 руб.

Капитал сей имеется в виду реализовать:

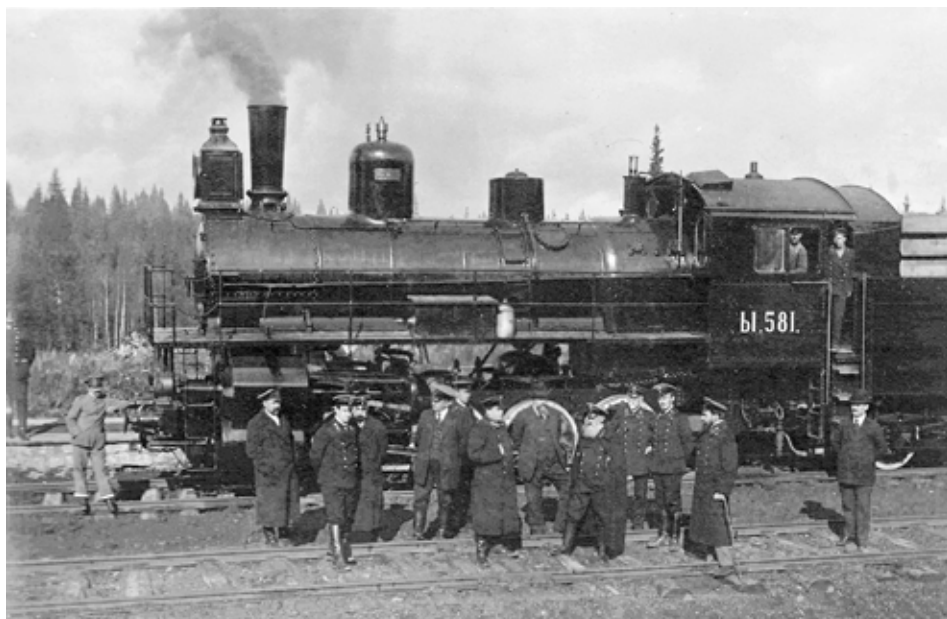
а) выпуском 20 000 акций, нар. ценою по 500 руб. каждая, на общую сумму – 10 000 000 руб.;

б) выпуском 120 000 шт. не гарантированных правительством облигаций, из 5 % интереса и погашения, нар. ценою по 250 руб. каждая на – 30 000 000 руб.

Итого – 40 000 000 руб.

Остаётся присовокупить, что изложенные выше соображения и выводы основаны, между прочим, на подробных изысканиях, произведенных в 1900 году, как для выбора окончательных пунктов²⁹ и установления общего направления Полярно-Уральской ж. дороги, так равно для выяснения экономических условий её сооружения, и что, таким образом, имеется уже твердая почва к тому, чтобы отнестись к рассматриваемому вопросу с полною объективностью, без которой немислимо успешное начинание и, тем

²⁹ Как приведено выше, в первый год по открытии на дороге движения предположено перевезти всего 24 млн пуд. отпускных грузов. Относя на долю зерновых продуктов, леса, металлов и т.п. грузов 60 %, т.е. 14 400 000 пуд., провозная плата их может быть принята в 1/45 к. с пудо-версты, тогда как для остальных 9 600 000 пуд. она составит на круг 1/24 к. Этому будет соответствовать, за все расстояние, попутная плата в 9 и 17 коп. Прибавляя к сим ставкам экспедиционный сбор, в размере 1,50 и 1,75 коп. (см. прил. 4-ое), полные провозные платы составят: 10,50 и 18,75 коп. за пуд.



более, осуществление столь серьёзного предприятия, как предстоящее.

Финансовые результаты эксплуатации. Согласно приведенным выше соображениям и данным, ожидаемые по эксплуатации денежные обороты представятся в следующем вид:

Валовой доход.

1. Выручка от провоза по дороге, протяжением 400 верст:

а) грузов отпускных⁴, а именно: разных хлебных грузов, леса, кам. угля
и пр. 14400 000 п. х 10,50 коп. = 1 512 000 руб.

остальных грузов вывоза,
9600 000 п. х 18,75 коп. = 1 800 000 руб.

б) грузов ввозных,
6400 000 п. х 28,75 коп.³⁰ = 1 725 000 руб.

Всего от провоза 30 млн пуд. – 5 037 000 руб.

2. Разные дополнительные доходы³¹ – 250 000 руб.

³⁰ Означенные грузы таксировались по 1 до VII кл. общего тарифа, т.е., кр.ч., пол/15 коп. с пудо-версты, что, за все расстояние, составит: 27 коп. + 1,75 коп. = 28,75 коп.

³¹ Сюда главным образом относятся: 1) сбор с перевозок в служебных поездах: пассажиров, багажа, посылок и товаров большой скорости; с почтовых перевозок; за перевозку почты и воинской клади; с животных и пр. (60 000 руб.); 2) разные статьи дохода: за пользование водоснабжением, товарными платформами, станционными дворами, путями и пр.; за отдачу в наём помещений и земель; сбор с линейного телеграфа; доход от продажи старого имущества и другие поступления (50 000 руб.); 3) доход по финансовым и дополнительным оборотам и предприятиям (40 000 руб.); 4) доход от таксировки служебных перевозок (80 000 руб.), и 5) доход с телеграфно-телефонного сообщения по новой линии (20 000 руб.), – всего 250 000 руб.

3. Доход от пропуска грузов через элеваторы и от прочих механических манипуляций:

14400 000 п. х 2,00 коп. = 288 000 руб.

Всего – 5 575 000 руб.

4. Телеграфный сбор от побочных линий (Варандей–Усть-Цыльма и «Соболь»–Самарово – 40 000 руб.

Итого – 5 615 000 руб.

на версту – 14 037,50 руб.

Расход.

Таковой, собственно по эксплуатации дороги, принимается на круг в 50 % от валового дохода³² (кроме телеграфного сбора от побочных линий) и посему составит: 5 575 000 руб. х 0,50 коп. = 2 787 500 руб.

На содержание и ремонт станционных перегрузочных приспособлений в оконечных пунктах дороги, речных пристаней, а также

³² Такой размер общего расхода не может считаться, в данном случае, преуменьшенным, если принять в соображение не только экономический строй эксплуатации Полярно-Уральской ж. дороги – в особенности же её службы движения и тяги, с сравнительно ограниченным личным составом, вследствие исключения из круга её деятельности правильного пассажирского и всякого местного движения, – но и другие крайне выгодные условия, присущие рассматриваемому пути: возможность самой интенсивной утилизации подвижного состава провозом отпускных и ввозных грузов по всей длине дороги; умеренный расход на содержание и ремонт пути, обусловленный солидной конструкцией последнего, и прочих сооружений дороги; сравнительную дешевизну главных строительных материалов и топлива; наконец – и на это должно быть положено особое ударение – полную изолированность рассматриваемой дороги и, посему, независимость её от многих факторов, стесняющих хозяйство прочих ж. дорог.



побочных телеграфных линий – 200 000 руб.³³
итого – 2 987 500 руб.

на версту – 7 468,75 руб.

Чистый доход.

Всего 5 615 000 руб. – 2 987 500 руб. =
2 627 500 руб.

на версту – 6 568,75 руб.

Распределение чистого дохода.

На уплату 5 % интереса и погашения
капитала по облигациям в сумме
30 000 000 руб. – 1 500 000 руб.

В запасный капитал (10 % от чистого
дохода):

2 627 500 руб. \times 0,10 = 262 750 руб.

всего – 1 762 750 руб.

а потому остаток чистой прибыли составит:
2 627 500 руб. – 1 762 750 руб. = 864 750 руб.
а на 10 млн руб. акционерного капитала –
8,65 %.

Если такой результат, с первого же года
открытия по дороге движения, заслуживает
внимания, в особенности при той осторож-
ности заданий, которая поставлена в осно-
ву расчетов, то есть основание предпола-
гать, что, с увеличением движения, чистый
доход дороги со временем также возрастет,
и тем скорее, чем успешнее разовьется па-
роходство по сибирским водным сообщени-
ям и Северному морю, в связи с расшире-
нием морского коммерческого порта (в Ва-
рандейской бухте) и Обской гавани, с раз-
грузочными в них приспособлениями.

К вопросу о сооружении морского порта и речной гавани в конечных пунктах

Выше было указано, что к числу доба-
вочных сооружений и работ, вызываемых
местными условиями будущей эксплуата-
ции рассматриваемого рельсового пути,
относится также устройство в Варандей-
ской бухте Северного Ледовитого океана
морского порта, а в противоположном
конце дороги, при впадении р. Сось в Боль-
шую Обь, речной гавани.

Эти капитальные сооружения не были
введены в расценочную ведомость Поляр-
но-Уральской ж. дороги на том основании,
что они необходимы не только для надоб-
ностей частного предприятия, но, главным
образом, для развития судоходства и тор-

говли на севере России, и потому сим со-
оружениям присущ характер общегосудар-
ственных построек, возводимых, в боль-
шинстве случаев, самим правительством.

При нормальных условиях это, вероятно,
имело бы место и в настоящем случае; при-
нимая однако во внимание нынешнее фи-
нансовое положение государства, а с другой
стороны – невозможность ведения правиль-
ной по указанному пути эксплуатации, без
снабжения его, в то же время, такими при-
способлениями, которые обеспечивали бы
за ним беспрепятственный вывоз и подвоз
грузов водою, остается один лишь исход:
предоставить выполнение сказанных соору-
жений также частной инициативе.

Понятно, что потребные для сего значи-
тельные денежные затраты не могут быть
отнесены на счет строительного капитала
Полярно-Уральской ж. дороги, так как со-
ответственные суммы предназначены ис-
ключительно для устройства рельсового
пути, со всеми, и без того, многочисленны-
ми добавочными сооружениями и обзаве-
дениями³⁴, тогда как морской порт и речная
гавань, к которым, быть может, будет при-
соединена и таможня, суть постройки пра-
вительственной³⁵, подлежащие возведению
на особые ресурсы.

К таким ресурсам всего правильнее от-
нести т.н. портовые доходы, а именно: по-
пудный сбор со всех пропускаемых через
морской порт грузов, и корабельный –
с каждого из приходящих в порт и из него
отходящих судов. Эти сборы, взимаемые
с 1902 года во всех портах Империи на
одинаковых началах и по равным ставкам,
составляют ныне: первый, т.е. попудный –
от 0,25 до 1,00 коп. и корабельный – на круг
2,50 коп. или в сложности – от 2,75 до 3,50
коп., с пуда. С увеличением же попудного
сбора для Варандейского порта на 0,50 коп.,

³⁴ Как усматривается из расценочной ведомости, стои-
мость устройства собственно самой дороги не превысит
с версты 53 000 руб., тогда как на добавочные построй-
ки, обзаведения и расходы предвидено, сверх того,
11 100 000 руб., или на версту – 27 750 руб., т.е. 50 %
строительной стоимости дороги.

³⁵ Неоднократно высказывалась желательность распо-
лагать на Самоедском побережье морским опорным
пунктом, как для развития нашего рыбного и звериного
промыслов, так и для содействия морским экспеди-
циям для исследования Севера Сибири. В сих видах
Варандейский порт будет иметь выдающееся значение,
в особенности если принять во внимание близость его
к устью Печоры и к Карскому морю.

³³ Из них собственно на содержание и ремонт станцион-
ных разгрузочных приспособлений, инвентарного иму-
щества и пр. – 100 000 руб. и столько же на содержание
побочных телеграфных линий.

средний портовый сбор составить кр.ч. 3,50 коп³⁶.

Так как в настоящее время невозможно определить с точностью необходимый для постройки морского коммерческого порта и речной гавани расход, т.е. стоимость работ дноуглубительных а также, молов, разгрузочных дамб, доков, маяков и пр., равно стоимость разных обзаведений, как то землечерпательных машин и землесосов, пароходов, барок, ледорезов и прочих снарядов и принадлежностей порта и гавани, кроме введенных уже в расценочную ведомость собственно для надобностей железной дороги, – то означенный расход устанавливается пока в размере 10 млн руб., включительно расхода на администрацию и отчислений на уплату, за время производства работ, процентов и погашения на затраченный капитал. Принимая за сим портовые доходы кр.ч. в 3,50 коп. с пуда, а средний грузооборот в 30 млн пуд., валовой портовой сбор будет составлять не менее 1 000 000 руб. в год.

При таких условиях Общество Полярно-Уральской ж. дороги, с принятием на себя устройства морского порта и речной гавани, в состоянии будет – не обременяя государственного бюджета – возвести и оборудовать означенные сооружения одновременно с постройкой железной дороги, что, в данном случае, является не только желательным, но и непременно условием осуществления рассматриваемого предприятия, так как иначе правильная эксплуатация была бы неосуществима.

Остаётся присовокупить, что согласно вышеизложенному, самая отчётность по производству соответственных работ и связанных с ними расходов должна быть отделена от таковой по сооружению железной дороги; но, дабы не обременять, вместе с тем, хода работ излишними формальностями, казалось бы всего уместнее, по составлению подробных проектов и смет устройства морского порта и речной гавани, и по рассмотрении и утверждении их правительством, предоставить Обществу Полярно-Уральской ж. дороги право самостоятельного распоряжения установленными кредитами, наравне с производ-

ством расходов по постройке самой железной дороги, с тем, чтобы суммы, предназначенные для порта, гавани и их принадлежностей, отнюдь не употреблялись для посторонних надобностей³⁷.

Ближайшие, по сему предмету определения и, в том числе, порядок взимания портовых сборов, имеют быть оговорены в уставе Общества или изложены в особом к нему добавлении.

Докладная записка инженер-механика Е. К. Кнорре, представленная Министру Путей Сообщения

Вот её содержание, объясняющее как отношение г. Кнорре к г-ну Голохвастову, так и отношение г-на Голохвастова к данному делу.

«Ссылаясь на неоднократные ходатайства свои о разрешении устройства железной дороги общего пользования между Самоедским берегом Северного моря и устьем р. Соби и принимая также во внимание весьма важное значение сей линии, в особенности в настоящее время, когда она могла бы оказать государству, даже до полного её окончания, большую услугу, облегчением воинских перевозок с Дальнего Востока в Европейскую Россию, предоставлением многим тысячам рабочих верного заработка и развитием переселенчества в Сибири, нижеподписавшийся позволяет себе снова беспокоить Ваше Сиятельство почтительнейшею просьбою об оказании возможного содействия к скорейшему осуществлению указанного пути сообщения».

«Рассчитывая, даже при настоящем положении денежного рынка, реализовать строительный капитал без всякой гарантии со стороны правительства, нижеподписавшийся ограничивается испрошением лишь права на беспошлинный ввоз из-за границы потребных для сооружения дороги строительных материалов и принадлежностей, основываясь на такой же льготе, Высочайше дарованной г. Голохвастову. Дальнейшие основные определения устава общества нисколько не разнятся от условий, установленных для прочих частных железных дорог Империи».

³⁶ См. выноски 1-ю на стр. 228 в «Жел.-дор. Деле» с.г. №№ 37–38.

³⁷ Такой порядок уже применен при расширении Рижского порта, работы по коему производились и продолжают производиться, главным образом, распоряжением местного биржевого комитета.



«На основании произведенных в 1900 г. инженером п.с. Гетте изысканий, стоимость предприятия определилась, при всей осторожности заданий, в крайне умеренных размерах: собственно железнодорожный путь, протяжением 400 верст, расценивается в 51 тыс. руб. с версты (всего в 20 400 000 р.); со стоимостью же портовых приспособлений, элеваторов, электрических станций, телеграфного сообщения с с. Усть-Цыльмою и Тобольском и устройством в оконечных пунктах дороги двух поселков потребуются 75 425 руб. на версту, а всего с расходами на курсовые потери и на уплату процентов по облигациям во время сооружения дороги – 36 млн рублей. При этом пропускная способность проектируемой линии рассчитана на 120 млн пуд. в год, а провозоспособность – на 40 млн пудов».

«К сему нижеподписавшийся позволяет себе присовокупить, что последовавшее в четвертый раз, в силу Высочайшего разрешения, продление г-ну Голохвастову права на сооружение и эксплуатацию Обской ж. дороги частного пользования обусловлено представлением им результатов изысканий ко 2 апреля 1906 года; а так как к производству сих изысканий г. Голохвастов – после 18-летнего бездействия – все еще не приступил, то – как это доказывает его последнее ходатайство – он никоим образом не в состоянии будет исполнить своих обязательств к указанному времени, точно так же, как это имело место и ранее».

«Между тем, с приступом к необходимым мероприятиям нынешнею осенью, образуемое Общество Полярно-Уральской ж. дороги общего пользования получило бы возможность использовать весь рабочий период будущего года, как для производства окончательных изысканий, со съемкой и изучением соответственной части Самоедского побережья, так и для постройки поселков, проведения телеграфных линий и пр., без чего нельзя было бы открыть строительных работ, с полною гарантией их успешного исполнения. Присовокупляя к сему: 1) что предположенный Обский путь частного пользования не может иметь ни для государства, ни для торговли Сибири существенного интереса, так как исключает возможность пользоваться им кому бы то ни было, за исключением собственника, и 2) что предоставленное г. Голохвастову

разрешение на постройку частной дороги не лишает Правительство права на выдачу концессии на сооружение и эксплуатацию путей параллельных и с первою конкурирующих, – как это оговорено в первом данном г. Голохвастову разрешении на осуществление его предприятия, – нижеподписавшийся покорнейше просит Ваше Сиятельство не отказать в уравнивании прав всех причастных к делу лиц, испрошением Высочайшего Государя Императора разрешения к допущению его образовать ныне же частное Общество Полярно-Уральской ж. дороги и, по утверждении в узаконенном порядке устава Общества приступить вслед затем к производству работ».

Последняя докладная записка относится еще ко времени бытности министром п.с. князя М. И. Хилкова. Льготы, о которых просит в этой записке Е. К. Кнорре, признаны были возможными и целесообразными Комиссией о новых железных дорогах в марте 1907 года (см. Жел.-дор. Дело с.г. стр. 214), т.е. уже при втором преемнике покойного князя. Нынешний Министр путей сообщения, Ст. Секр. С. В. Рухлов, в уважение трудов П. Э. Гетте оказал могущественную поддержку вдове его г-же Гетте по начётам Государственного Контроля. Из этих фактов можно, очевидно, заключить, что как личные труды П. Э. Гетте, так и совместные с Е. К. Кнорре, по общему им делу, удостоивались сочувствия со стороны правительства, и если заботы этих высокопочтенных предпринимателей не осуществились на деле, то неуспех их проекта Полярно-Уральской ж. дороги надо искать вне их – в препятствиях, чинимых их конкурентом г-м Голохвастовым, ничего серьезно не сделавшим по составлению своего проекта и только злоупотребившим Высочайше дарованными ему милостями по отсрочкам. Остается искренно желать, чтобы таких лиц в железнодорожной предприимчивости не являлось, чтобы судьба дала наконец Е. К. Кнорре осуществить Полярно-Уральское дело его и чтобы даже помещённая [в журнале] заметка о паромных путях в северных водах послужила по возможности ему на пользу.

*(«Железнодорожное Дело» 1912 год,
№ 33 С. 194–196, № 37–38 С. 227–230,
№ 40 С. 239–243) ●*



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

146

- *Городские транспортные системы в Ираке.*
- *Транспортно-информационное пространство в условиях кластерного развития рынка комплексной транспортной услуги.*
- *Влияние низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений безбалластной конструкции пути.*
- *Прогнозирование безопасной эксплуатации колес грузовых вагонов методами механики разрушения.*

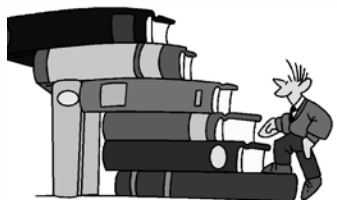
КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ



НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

152

Недавно вышедшие книги и учебники российских издательств.



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

*Selected abstracts of D.Sc. and Ph.D.
theses submitted at Russian transport universities*

*Текст на английском языке публикуется
во второй части данного выпуска.*

*The text in English is published in the second
part of the issue.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-14>

АБУЖВАИД Хусам Аббас Мохсин. Совершенствование городских транспортных систем Ирака / Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – 19 с.

Развитие любого города во многом зависит от совершенствования городских транспортных систем (ГТС). Международный опыт подчеркивает важность развития и регулирования секторов общественного транспорта, так как они играют жизненно важную роль в различных аспектах современной жизни. Социальная и экономическая деятельность всё в большей степени зависит от развития транспортных услуг для удовлетворения потребностей в перевозке отдельных лиц.

Актуальность работы состоит в необходимости совершенствования ГТС Ирака. Исследования в области ГТС в Ираке немногочисленны и недостаточны. Существует серьёзная проблема, связанная с планированием перевозок общественным транспортом из-за увеличения численности населения в связи с его приростом ежегодно на 2,5 %, высоким спросом на перевозки, значительным ростом населения городов и широким использованием личных транспортных средств. С 2003 года количество частных транспортных средств увеличилось на 122 %. Кроме того, существуют сезонные проблемы с транспортом из-за наплыва туристов в некоторых городах Ирака, таких как Кербела и Наджаф.

Целью исследования стала разработка методики совершенствования структуры улично-дорожной сети и системы городского транспорта, обеспечивающей эффективность их функционирования в городах Ирака.

Проанализированы и изучены характеристики городов Ирака: численность и плотность населения, площади городов, уровень автомобилизации, максимальная протяжённость территории. На основе выполненного анализа современного функционирования транспортных систем уточнена классификация городов с учётом специфики Ирака.

Проведён анализ исследований по выбору видов ГОТ и разработана классификация рядов вместимости подвижного состава и варианты ГОТ для городов Ирака, выполнен расчёт объёма перевозок на каждый тип подвижного состава в процентах, выбраны ряды вместимостей подвижного состава, рассчитан объём перевозок, приходящийся на каждый тип подвижного состава.

Откорректированы границы интервалов средней напряжённости пассажиропотока для групп городов Ирака, что позволяет выбирать вид ГОТ и его долю перевозок для каждого типа подвижного состава.

Произведена комплексная оценка эффективности транспортных систем в современных условиях по экономическим, социальным и экологическим показателям, разработана блок-схема алгоритма определения экономических, экологических и социальных эффектов.

В результате расчётов экономических, экологических и социальных показателей для городов Ирака отмечено, что эти показатели недостаточно эффективны и необходимо совершенствование улично-дорожной сети, поэтому рассмотрены возможные варианты совершенствования структуры городской сети.

Выполнен анализ исследований по совершенствованию топологической структуры транспортных сетей городов. Предложен алгоритм планирования связности и эффективности улично-дорожной сети с использованием индексов на основе топологических характеристик.

Разработана комплексная методика совершенствования ГТС Ирака, который включает в себя четыре этапа. На первом этапе обосновываются и определяются основные характеристики городов, а также разделение поездок по времени, потребностям и услугам. На втором – производится комплексная оценка эффективности транспортных систем в современных условиях по экономическим, социальным и экологическим показателям. На третьем этапе выбирается вид ГОТ. На четвёртом этапе выполняется анализ и совершенствование

структуры транспортных сетей. Первые три определяют методику выбора вида транспорта, а четвёртый – совершенствование структуры транспортных сетей.

Разработаны рекомендации по развитию транспортной сети города Наджаф. Для данного города представлено обоснование и выбор видов ГОТ, проведены исследования по оценке эффективности и совершенствования улично-дорожной сети. Разработана топологическая карта города, на основе которой выполнен расчёт оценки связности и эффективности улично-дорожной сети и разработаны рекомендации по её совершенствованию.

Рекомендовано увеличить долю общественного транспорта и при выборе видов ГОТ учитывать не только экономические показатели, но и экологические и социальные.

Перспективы дальнейшей разработки темы находятся в сфере развития иракских городских систем и открытия перспектив сотрудничества в этой области между Россией и Ираком, а также связаны с совершенствованием методологии проектирования городских транспортных систем.

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте.

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

Зубков В. В. Методология формирования транспортно-информационного пространства в условиях кластерного развития рынка комплексной транспортной услуги / Автореф. дис... докт. техн. наук. – Екатеринбург, УрГУПС, 2023. – 48 с.

Развитие экономики, в частности, цифровой экономики, повышает потребность в транспортных услугах. Транспорт предоставляет возможность цифрового рыночного обмена, при этом рыночные виртуальные взаимодействия стимулируют развитие как транспортной системы страны (развитие кластеров комплексной транспортной услуги), так и совершенствование мирового транспортного комплекса.

Организация процессов и управление ими при рыночном формировании транспортных и производственных услуг находятся в области координационных воздействий регуляторов (региональных, межрегиональных и федераль-

ных властей) на субъекты транспортно-производственной деятельности, социальной и экономической деятельности. Воздействия регуляторов направлены на вовлечение большего количества субъектов в социально-экономическое пространство, а также на эффективное использование имеющихся ресурсов для поэтапного и планомерного развития региональных и межрегиональных взаимоотношений и экономических связей, обеспечивающих достижения наивысшего уровня развития регионов (субъектов Российской Федерации) и государства в целом через призму повышения роста жизнедеятельности населения страны.

Воздействие регуляторов основывается на нормативно-правовой деятельности, реструктурирующих функциях, методах и механизмах управления при соблюдении целевых условий воздействующих факторов.

Развитие кластеров – это многоэтапный и сложный процесс, формирующийся не только с точки зрения совершенствования производственных процессов и повышения качества удовлетворения потребительского спроса, но и с точки зрения социально-экономического развития общества, так как структурирование и динамика роста общественной среды напрямую зависят от уровня результативности экономических процессов.

В настоящее время более всех развиваются промышленные кластеры, включающие в себя участников основного производственного процесса, необходимые для производства ресурсы, наборы подпроцессов деятельности, которые связаны между собой едиными целями и задачами совершенствования, построения комплексного технологического процесса и единой защиты от воздействующих факторов конкуренции.

Развитие промышленных кластеров создаёт предпосылки для формирования региональных кластеров, в частности, кластеров комплексной транспортной услуги, так как производство продукции и её доставка тесно связаны с потреблением видов транспортных услуг.

Кластер комплексной транспортной услуги – это экономически рациональное направление развития промышленного и транспортного сегментов экономики, повышение жизнеспособности населения страны. Основной источник развития транспортных кластеров – это интеграция производственных и транспортных процессов, на основе которой происходит построение стабильных экономических взаимоотно-



ношений между субъектами производства, субъектами транспортных услуг и социально-экономическими субъектами.

Целью диссертационного исследования являлось развитие методологии формирования транспортно-информационного пространства в условиях кластерного развития рынка комплексной транспортной услуги.

В ходе проведённых исследований использовались методы системного анализа, теория активных систем, теория управления, теория самоадаптивных, самоорганизующихся и самоподдерживающихся систем, теория информационного общества и цифровой экономики, теория развития кластеров, теория синергетического подхода и оценки интегрирующих процессов.

Исследование по построению методологии формирования транспортно-информационного пространства в условиях кластерного развития рынка комплексной транспортной услуги даёт возможность обосновать выводы и корректирующие действия, вектор которых направлен на формирование консолидированной стратегии развития субъектов РФ.

В результате анализа функционирования действующей модели транспортных услуг на рынке грузоперевозок в железнодорожной отрасли установлено, что гарантированная ответственность за выполнение главных показателей качества обеспечивается только в границах ответственности железнодорожного комплекса, при этом не обеспечиваются координация и взаимовлияние на критерии качества транспортных услуг в других видах транспорта в общей транспортной системе, что удорожает готовую продукцию и приводит к неконкурентоспособности потребителей транспортных услуг.

Разработана методика оценки качества транспортного обслуживания в модели комплексной транспортной услуги, которая позволяет проследить и оценить влияние каждого субъекта на обеспечение качества услуг при помощи максимальных значений коэффициента качества.

Разработан метод детализации структуры воздействия субъектов кластера комплексной транспортной услуги на повышение качества обслуживания, который определяет степень их ответственности за соблюдение плана оказания транспортных услуг, которые рассчитываются для каждой категории перевозок.

Разработана методика оптимизации транспортно-производственных процессов класте-

ра комплексной транспортной услуги, которая позволяет определять суммарные наилучшие (оптимальные) варианты параметров процесса реализации видов транспортных услуг, которые определяются и рассчитываются на основе наилучших (оптимальных) вариантов параметров, входящих в основной процесс подпроцессов.

Разработана сравнительная модель оптимального варианта оптимизации транспортно-логистического процесса, позволяющая исследовать свойства транспортно-производственных процессов формирования и реализации комплексной транспортной услуги как основной продукции транспортной отрасли.

Разработана методология построения виртуальной системы интеграции, которая обеспечивает рациональное и логически зависимое проектирование наиболее важных архитектуробразующих элементов направленной (квотированной) интеллектуальной системы межрегионального и регионального уровней.

Разработана концептуальная модель взаимодействия информационных потоков кластера комплексной транспортной услуги, которая обеспечивает получение опыта и знаний из транспортно-информационной среды от реализуемых процессов и формирование технологий их применения.

Разработана методология построения матрицы показателей, отражающей фактические и прогнозные объёмы комплексной транспортной услуги по регионам страны, структурирует региональные, межрегиональные, экспортные и импортные комплексные транспортные услуги с разделением их по видам транспорта.

Разработана методология формализации информационных потоков кластера комплексной транспортной услуги, взаимоувязывающая транспортно-технологические процессы (подпроцессы) между субъектами кластера и исполнителями процессов (подпроцессов) на основе полученных знаний об областях их реализации и ресурсных возможностях субъектов кластера, обеспечивающая условия для эффективной оптимизации процесса управления транспортно-логистическими системами и кластером комплексной транспортной услуги.

Разработана межотраслевая информационно-интеллектуальная модель интеграции информационных потоков субъектов межрегионального уровня, накапливающая и концентрирующая информационные знания в едином

транспортно-информационном пространстве и представляющая собой квотированную информационно-интеллектуальную систему.

Разработана методология построения межатраслевой информационно-интеллектуальной модели интеграции информационных потоков субъектов межрегионального уровня, которая обеспечивает концентрацию в одном периметре информационных потоков, исходящих из интегрирующих информационных систем субъектов межотраслевого, межрегионального уровней, федеральных регуляторов и бизнес-объединений, и предоставляет возможность без влияния человека реализовать централизованный учёт, анализ и контроль за реализацией и фактическим состоянием процессов принятия оптимальных управленческих решений.

Разработана методология формирования виртуальной системы интеграции согласованного субъектного сотрудничества на региональном и межрегиональном уровнях, которая обеспечивает формирование квотированных информационно-интеллектуальных продуктов, направленных на определение оптимальных координационных, управленческих решений в контексте кластерного развития рынка комплексной транспортной услуги.

Разработана методология оценочных действий по определению синтеза взаимодействия и интеграции субъектов транспортно-информационного пространства, на основе которой представители органов власти (субъекты-регуляторы) формируют комплексные программы, мотивирующие процессы интеграции, виртуального сотрудничества и процессы развития кластеров комплексных транспортных услуг и развития субъектов РФ.

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте.

Работа выполнена и защищена в Уральском государственном университете путей сообщения.

Петров А. В. Влияние низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений безбалластной конструкции пути / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 24 с.

Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения в нашей стране предполагает строительство новых выделенных железнодо-

рожных линий для высокоскоростного железнодорожного движения. Наиболее перспективной в настоящее время является высокоскоростная магистраль (далее ВСМ) «Москва – Санкт-Петербург» со скоростями движения до 400 км/ч. Все проекты ВСМ предполагают применение новых технологических и инженерных решений, обеспечивающих высочайший уровень надёжности и безопасности перевозок пассажиров и грузов, которые обеспечат необходимый комфорт для пассажиров.

Мировой опыт строительства и эксплуатации линий ВСМ подтвердил эффективность применения безбалластной конструкции пути (далее БКП). Например, проработка проекта ВСМ «Москва – Казань» подразумевала применение в качестве базовой безбалластную плитную конструкцию пути CRTS III RUS, адаптированную под российские условия эксплуатации. Известно, что в БКП рельсовые скрепления с промежуточным эластичным слоем являются главным элементом, упругие свойства которых формируют от 80 до 95 % упругих свойств всей конструкции пути в целом. Это подтверждается натурными измерениями прогиба рельса под воздействием нагрузок от подвижного состава.

Зарубежная нормативно-техническая документация регламентирует требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, учитывая влияние низких температур. Нижние пороговые значения испытательных температур в немецких и китайских нормативах установлены, соответственно, как -20°C и -35°C . Согласно требованиям предпроектной документация линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», для российских условий эксплуатации необходимо учитывать минимальную температуру -50°C . Таким образом актуальными становятся вопросы усовершенствования расчётной модели определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП с учётом влияния низких температур с последующим формированием требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» при воздействии низких температур до -50°C ; и по корректировке методов подтверждения соответствия этим требованиям.

Цель диссертационной работы заключается в определении влияния низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений БКП,



работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

Определено влияние низких температур на жёсткость узлов рельсовых креплений БКП. Уточнена расчётная модель определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП посредством введения коэффициентов, позволяющих учитывать влияние низких температур на изменение жёсткости рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем.

Определены коэффициенты изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Byrel в состоянии заводского изготовления в диапазоне температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученные в лабораторных условиях. Экспериментально подтверждено, что с понижением температуры до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel происходит, соответственно, увеличение статической жёсткости в 2,11 и 3,57 раза, а также происходит соответственно увеличение динамической жёсткости эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel в 17,54 и 9,06 раза.

Проведены испытания на Экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ по определению прогиба рельса на участке безбалластного пути конструкции Feste Fahrbahn Boegl. Адекватность расчётов подтверждена удовлетворительной сходимостью с экспериментальными данными. Сходимость расчётных результатов с экспериментальными данными составила 94,8 %.

Сформированы дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых креплений БКП для российских условий эксплуатации для участков высокоскоростного железнодорожного сообщения со скоростями движения до 400 км/ч проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», рекомендуемые для включения в ГОСТ 32698:

- вертикальная жёсткость узла рельсового крепления должна быть в пределах, кН/мм – 16–27;
- изменение статической жёсткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$), не должно превышать коэффициент – 4;
- соотношение динамической жёсткости к статической жёсткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент: при температуре $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1,5; при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2,0; при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2,5; при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,0; при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3,5;

при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 5,0; при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 18,0.

Разработаны рекомендации по методам определения упругих характеристик узла рельсового крепления с промежуточным эластичным слоем для БКП с учётом влияния низких температур.

Перспективой дальнейшей разработки темы является проведение исследований работы рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем БКП на реальных скоростях движения под нагрузками от реального высокоскоростного подвижного состава на высокоскоростном полигоне, которым должен стать участок линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог.

Работа выполнена и защищена в Российском университете транспорта.

Чунин В. В. Прогнозирование безопасной эксплуатации колёс грузовых вагонов методами механики разрушения / Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 24 с.

Анализ условий эксплуатации и статистики отказов железнодорожных колёс показывает, что критерии прочности, указанные в действующих стандартах, не могут полностью гарантировать их безотказность эксплуатации, отсутствуют требования и соответственно методики по оценке стадии развития трещины. При недостаточной вязкости металла и высокой его чувствительности к концентраторам напряжений может начать распространяться усталостная трещина вплоть до критической её длины, что опасно из-за возможности хрупкого разрушения **колеса** вследствие влияния сезонных факторов.

Разработчики колёс на этапе проектирования не прогнозируют стадию развития усталостных трещины до наступления предельного состояния. Межремонтные пробеги вагона, как правило, устанавливают исходя из периода технического обслуживания деталей, узлов и не учитывают живучесть основных несущих элементов. Так, например, при увеличении осевой нагрузки, применении новых материалов и конструкций, возрастает вероятность изломов.

В настоящее время активно обсуждается вопрос о возможности эксплуатации литых колёс в условиях российских железных дорог. Но учитывая, что технология производства литых колёс не подразумевает проведение мно-

гостадийного горячего деформирования, а формирование **колеса** производится путём отливки металла под давлением в форму. Такая технология изготовления обуславливает ряд отличий в свойствах и качестве металла литых колёс по сравнению с цельнокатанными колёсами.

Таким образом, для исключения возможных рисков возникает необходимость в разработке единой методики оценки стадии развития трещины от динамических воздействий в эксплуатации, проведении исследований поведения металла колёс при снижении температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, определение степени изменения свойств и параметров разрушения. По результатам, которых должны быть определены показатели, влияющие на безопасную работу **колеса**, и получены их минимально допустимые значения для российских условий эксплуатации.

Целью исследования является обеспечение безопасности эксплуатации вагона путём прогнозирования его пробега после возникновения усталостной трещины в диске **колеса** до его излома, за счёт определения научно обоснованных требований к межремонтным пробегам.

Анализ нормативной, научно-технической документации показал отсутствие требований и, следовательно, методики оценки живучести колёс, а также учёта низких климатических температур, при которых изменяются механические свойства металла колёс, и увеличивается жёсткость пути. Для обеспечения безопасной эксплуатации установлена необходимость прогнозирования пробега вагона после возникновения трещины в колесе, особенно при увеличении осевой нагрузки до 27 тс, снижении веса тары вагонов на 25 % и применении новых материалов и конструкций.

Проведённые исследования показали, что наиболее опасными являются дефекты металла колёс, расположенные в зоне максимальных амплитуд эксплуатационных напряжений, которые с определённой вероятностью могут быть не выявлены проведением НК, что приведёт к росту трещины, минуя этап накопления усталостных повреждений и ускоренному разрушению.

Проведённые экспериментальные испытания стандартных образцов, вырезанных из колёс, изготовленных по различным технологическим процессам и из разных марок сталей для литого **колеса** из стали марки AAR B, а для цельнокатаного – из стали марки 2 показали, что характеристики циклической вязкости разрушения металлов различаются: для стали

цельнокатаного **колеса** при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, **чем** для стали литого, но при снижении температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения становятся соизмеримыми.

Проведённый анализ методов по оценке прочности вагонных колёс показал, что при проведении испытаний методом кругового изгиба их нагружение является наиболее приближённым к эксплуатационному. Получены экспериментальные кривые живучести, при этом количество циклов до разрушения цельнокатанных и литых колёс составили 8,1 и 1,0 млн. циклов нагружений соответственно.

Разработана виртуальная модель стенда для испытаний колёс круговым циклическим изгибом для численного моделирования развития трещины в диске литого и цельнокатаного колеса от начального дефекта для расчёта значений КИН, согласно которым обоснована необходимость оценки момента страгивания трещины и излома колёс по значениям КИ на фронте трещины соответствующему I типу раскрытия.

Разработана динамическая модель грузового вагона с упругой колёсной парой, с инерционными, жёсткостными, упруго-диссипативными и геометрическими параметрами, соответствующими экипажу грузового вагона. По результатам ходовых динамико-прочностных испытаний модель имеет удовлетворительную сходимость по динамическим показателям и адекватно описывает движение вагона в эксплуатации. Предложенная методика позволяет определять НДС колёсной пары грузового вагона, оценивать прочность, ресурс и живучесть различных конструкций осей и колёс и может быть применена на этапе проектирования для прогнозирования периода развития трещины в колесе с целью обеспечения его безопасной эксплуатации.

По результатам моделирования получены суммарные диаграммы распределения амплитуд динамических напряжений от частоты их возникновения в литом и цельнокатаном колёсах. Живучесть литого и цельнокатаного **колеса** в эксплуатации, то есть рост трещины от начального дефекта до излома при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила 944,2 тыс. км и 671,8 тыс. км, а при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 283,8 тыс. км и 669,6 тыс. км соответственно.

Для безопасной эксплуатации грузовых вагонов предлагается установить минимальный допустимый коэффициент запаса по живучести колёс, равный 2,0. Таким образом, безопасность эксплуатации грузового вагона с литыми колё-



сами будет обеспечиваться на межремонтном пробеге 110 тыс. км, при этом коэффициент запаса по живучести составит 2,58, с цельнокачественными колёсами – 210 тыс. км, при этом коэффициент запаса по живучести составит 3,19.

Полученные результаты могут быть использованы для установления требований к межремонтным пробегам колёсных пар грузовых вагонов.

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

Список на английском языке публикуется во второй части данного выпуска

The list of titles in English is published in the second part of the issue

Бимбереков П. А. Использование теоретических и эмпирических методов при построении моделей в задачах водного транспорта: Учеб. пособие. – Новосибирск: СГУВТ, 2023. – 354 с. ISBN 978-5-8119-0874-5:

Белокуров В. П., Белокуров В. П., Кораблев Р. А., Бусарин Э. Н. Принятие оптимальных решений в технологии транспортных процессов: Учеб. пособие. – Воронеж: Воронежский гос. лесотехнический ун-т, 2023. – 183 с. ISBN 978-5-7994-1057-5.

Бородин А. Ф., Биленко Г. М., Бородина Е. В., Кузнецова Т. Г. Управление эксплуатационной работой. Организация работы сортировочной станции: Учеб. пособие / под редакцией к. т. н. А. Ф. Бородина, Г. М. Биленко. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 246 с. ISBN 978-5-7473-1162-6.

Вучик Вукан Р. Транспорт в городах, удобных для жизни: доработанное издание / перевод с англ. Д. Поповой. – М.: Альпина ПРО, 2023. – 675 с. ISBN 978-5-206-00045-0.

Данейкин Ю. В. Управление развитием высокотехнологического промышленного комплекса: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 282 с. ISBN 978-5-16-018126-4.

Епифанов В. В., Обшивалкин М. Ю. Качество транспортных услуг в системе общественного автомобильного транспорта: Монография. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – 270 с. ISBN 978-5-9795-2295-1.

Журавлев Н. П., Потапов И. П., Савельев М. Ю. Промышленный железнодорожный транспорт: состояние и перспективы развития: Учеб. пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2023. – 144 с. ISBN 978-5-907710-81-8.

Комаров В. М., Акимова В. В. Люди и транспорт: город для жизни: Монография. – М.: Изд. дом ДЕЛО, 2023. – 158 с. ISBN 978-5-85006-479-2.

Коновалова Т. В., Котенкова И. Н., Сенин И. С., Домбровский А. Н. Устойчивое развитие городской транспортной системы: Монография. – Краснодар: Издательский дом – Юг, 2023. – 230 с. ISBN 978-5-91718-731-0.

Копытенкова О. И., Вильк М. Ф., Алиев О. Т. [и др.] Повышение безопасности труда работников локомотивных бригад. – М.: Авторская мастерская: Давгуненко А. А., 2023. – 165 с. ISBN 978-5-907450-53-0.

Краснянская О. В. Современные тенденции организации научно-технологического развития в промышленности: Монография. – М.: Ruscience, 2023. – 277 с. ISBN 978-5-466-01683-3.

Кубрин С. С., Яппаров Е. Р., Иванов И. М. Радиосвязь и телекоммуникации: Учебник. – М.: РУТ, 2023. – 311 с. ISBN 978-5-00166-900-5.

Дальнейшие перспективы исследований могут быть связаны с вопросом уточнения требований к порогу чувствительности методов НК, применяемых при обнаружении дефектов колёс.

2.9.3. – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация.

Работа выполнена и защищена в Российском университете транспорта. ●

Кудрявцев Е. М., Гавриленко А. В., Джафари Мостафа. Моделирование внутренних усилий в металлоконструкциях подъемно-транспортных машин (на ранних этапах проектирования): Учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2023. – 337 с. ISBN 978-5-4323-0460-5.

Лобанова Ю. И. Очерки рефлексивной психологии стилей: (на примере стилей автовождения): Монография. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – 309 с. ISBN 978-5-9227-1300-9.

Минниханов Р. Н., Жанказиев С. В., Аникин И. В. [и др.] Интеллектуальные транспортные системы: Учеб. пособие. – Казань: Идел-Пресс, 2023. – 239 с. ISBN 978-5-4494-0160-1.

Москаленко М. А., Друзь И. Б., Москаленко В. М. Особенности влияния узлов соединения набора на несущую способность бортовых перекрытий судов ледового плавания: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 194 с. ISBN 978-5-16-017729-8.

Новиков А. Н., Еремин С. В., Шевцова А. Г. Пути повышения безопасности функционирования общественного транспорта в условиях перспективного развития города: Монография. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова; Орёл: Изд-во ОГУ им. И. С. Тургенева, 2023. – 238 с. ISBN 978-5-361-01180-3.

Носко А. Л. Эффективный выбор и практические рекомендации по совершенствованию конструкций тормозов ГПМ: Монография. – М.: Научный инновационный центр Международный институт стратегических исследований, 2023. – 135 с. ISBN 978-5-907682-22-1.

Оруч Т. А., Гоман К. И. Методологические основы инновационно-технологического развития промышленной региональной экономической системы в условиях импортозамещения: Монография. – Курск: Университетская книга, 2023. – 226 с. ISBN 978-5-907710-49-8.

Петров А. И., Игнатиогин В. А., Захаров Д. А. Специфические формы транспортного обслуживания населения крупных городов: Учеб. пособие. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 125 с. ISBN 978-5-9961-3070-2.

Руднева Л. Н., Гурьева М. А., Корякина Е. А. [и др.] Современная индустриальная экономика: условия развития: Монография. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 231 с. ISBN 978-5-9961-3076-4.

Серебряков А. С. Техническая диагностика подвижного состава. Контроль главной изоляции тяговых электродвигателей. – М.: Лань, 2023. – 292 с. ISBN 9785507450282.

Хачатрян Н. К. Моделирование процесса организации железнодорожных грузоперевозок: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2023. – 164 с. ISBN 978-5-317-07005-2.

Шутова Н. К., Ли В. Н. Обеспечение эффективности эксплуатации системы электроснабжения железных дорог переменного тока регулированием потоков реактивной мощности в условиях роста грузооборота: Монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2023. – 117 с. ISBN 978-5-262-00953-4.

Составила Н. ОЛЕЙНИК ●



БОРИС АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЁВИН

(11.08.1949 – 30.06.2023)

30 июня 2023 года на 74-м году жизни ушёл из жизни президент Ассоциации вузов транспорта, президент Российского университета транспорта, бывший ректор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), признанный российский учёный, доктор технических наук, профессор Лёвин Борис Алексеевич.

Вся профессиональная, научная и образовательная деятельность Бориса Алексеевича Лёвина, выдающегося государственного и общественного деятеля, руководителя, учёного и педагога, внёсшего громадный вклад в развитие и повышение международного престижа отечественного образования и науки, связана с МИИТ.

После окончания в 1973 году МИИТ по специальности «Автоматика и телемеханика» работал инженером кафедры «Автоматизированные системы управления», параллельно с комсомольской и организационной работой закончил аспирантуру, а с 1977 года возглавил ее в качестве заведующего. В 1989 году по инициативе и под руководством Б. А. Лёвина на базе аспирантуры был создан Отраслевой центр подготовки научно-педагогических кадров. В 1990 году Б. А. Лёвин защитил докторскую диссертацию по теме «Непрерывное совершенствование и воспроизводство кадрового потенциала, основного фактора организации устойчивой и безопасной деятельности отрасли», а в 1992 году ему присвоено учёное звание профессора. С 1991 года – ректор Всесоюзного института повышения квалификации руководителей и специалистов железнодорожного транспорта (с 1995 года – Российская академия путей сообщения), а с марта 1997 года – ректор МИИТ, а затем Российского университета транспорта (МИИТ).

Под его руководством университет активно участвовал в реализации целого ряда крупных проектов кадрового обеспечения и научного сопровождения транспортной отрасли, реализации стратегических документов развития транспорта и транспортного строительства, совершил грандиозный прорыв в своём историческом развитии, впервые в истории транспортного образования получил федеральный статус и сегодня является самым передовым научно-образовательным комплексом, безусловным лидером транспортного образования в России. С ноября 2018 года – президент РУТ (МИИТ).

В течение многих лет Борис Алексеевич Лёвин возглавлял Совет по образованию и науке при Координационном транспортном совещании государств-участников СНГ, Ассоциацию вузов транспорта, Международную ассоциацию транспортных университетов, многочисленные экспертные советы в сфере транспорта, транспортной науки и образования.

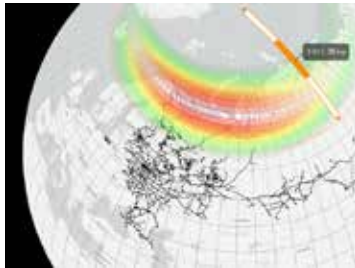
С момента создания журнала «Мир транспорта» Борис Алексеевич Лёвин бессменно возглавлял его работу в качестве председателя редакционного совета и главного редактора. Б. А. Лёвин уделял неизменное внимание развитию научно-публикационной деятельности ученых транспорта, входил в редакционные коллегии целого ряда других отраслевых журналов.

Борис Алексеевич Лёвин является автором более 530 научных трудов. Им подготовлены 21 кандидат и 12 докторов наук, разработаны механизмы сближения учебно-методической деятельности транспортных вузов страны, интеграции существующих и введения новых транспортных специальностей, подготовки для транспортного комплекса страны специалистов нового поколения по управлению взаимодействием различных видов транспорта, проведения сертификации персонала транспортных отраслей.

Заслуги Бориса Алексеевича Лёвина в развитии транспортного образования и науки отмечены премиями Правительства Российской Федерации (2004 году – в области науки и техники, в 2010 году – в области образования). Б. А. Лёвин был награждён государственными наградами, в том числе, в 2016 году – орденом Александра Невского, в 2021 году – орденом «За заслуги перед Отечеством» III степени, многочисленными ведомственными наградами – медалью Павла Мельникова, медалью Петра Губонина, медалью Августина Бетанкура, медалью «За заслуги в развитии транспортного комплекса России», нагрудными знаками «Почётный работник транспорта России» и «Почётный железнодорожник».

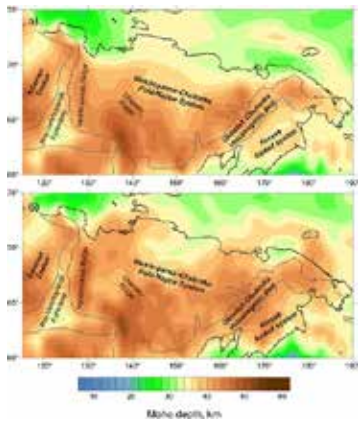


T



GEOPHYSICS AND TRANSPORT INFRASTRUCTURE 154

Assessment of the influence of geophysical factors on the sustainable operation of the transport systems and system analysis of their impact on transport infrastructure at the Arctic latitudes.



THEORY





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 154–182

Geophysical Processes in the Arctic and the System Analysis of their Impact on Operation and Development of the Transport Infrastructure



Alexey D. GVISHIANI



Igor N. ROZENBERG



Anatoly A. SOLOVIEV

Alexey D. Gvishiani¹, Igor N. Rozenberg², Anatoly A. Soloviev³

^{1,3} *Geophysical Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.*

² *Russian University of Transport, Moscow, Russia.*

^{1,3} *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.*

² *JSC NIIS, Moscow, Russia.*

✉ i.rozenberg@geosc.ru.

ABSTRACT

The scientific research that has become the subject of consideration in this article is related to assessment of the influence of geophysical factors on sustainable functioning of transport systems and the system analysis of their impact on the transport infrastructure at the Arctic latitudes. The research is a new direction in the field of study of operational reliability of transport systems and scientific support for development of transport infrastructure in the Russian Arctic.

The paper touches upon the issues of reliability and possible failures of technical equipment under the influence of space weather, and also discusses multifaceted problems of safety and efficiency of development of transport systems considering new data on the structure and properties of the lithosphere referring

to thawing of permafrost and mineral deposits. A separate section is devoted to new information on seismic activity and seismic hazard assessment in areas of operation and promising development of the transport infrastructure of the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF).

Intellectual accounting and generalisation of the obtained interdisciplinary results together with their visualisation are provided by geoinformatics methods. The paper presents also the results of adoption of modern geodatabase management systems, of the application of modern technologies of geoportals and interactive spherical visualisations for qualitative presentation of new geophysical knowledge obtained in the course of research.

Keywords: geomagnetism, seismic hazard, geophysical processes, geological structures, geoinformatics, Arctic zone of the Russian Federation, transport systems, transport infrastructure, sustainable development.

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 21–77–30010 «System Analysis of the Dynamics of Geophysical Processes in the Russian Arctic and Their Impact on Development and Operation of the Railway Transport Infrastructure».

For citation: Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A. Geophysical Processes in the Arctic and the System Analysis of their Impact on Operation and Development of the Transport Infrastructure. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 154–182. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-1>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The active development of the Russian Arctic in the 21st century is inevitably associated with widespread involvement of high technologies. Such technologies, first, are necessary for stable development of industry and transport in hard-to-reach regions and under extreme climatic conditions inherent in the Arctic region. However, being resilient to these natural factors, complex technological systems often become sensitive to other natural risks.

For example, extended power lines (PL) and pipelines in high-latitude areas effectively cope with low temperatures, confidently performing their functions over vast areas. At the same time, their sustainable functioning is threatened by extreme manifestations of space weather. The latter can lead to excessive loads on electric power systems and installations that provide anti-corrosion protection of pipelines, up to their complete failure. Thus, besides climate change [1], a number of purely geological and geophysical factors should be taken into account both for sustainable operation of existing high-tech systems in the Arctic, and when planning further development of these infrastructures in still insufficiently developed regions.

The modern technological society is a complex interweaving of dependencies and interdependencies between several of its critical infrastructures [2]. As technological infrastructures become more complex, any major disruption to one of them can have wide-ranging consequences for others and lead to interdependent failures [3]. The impact on these interdependent infrastructures can last for several years with a probability of manifestation of significant social and economic impacts [4; 5].

The development of transport infrastructure is of critical importance for both partial and full-scale development of the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF). This is also emphasised by the «Strategy for development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period until 2035», approved by Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2020, No. 645. Besides other points, this strategy provides for a significant development of transport infrastructure in a number of northern regions of Russia, which includes construction of new railways, interregional roads and airports, creation of waterways, taking into account plans for development of the mineral resource base and

ensuring the connectivity of seaports with the country's inland territories. The integrated, interconnected, and systemic development of the infrastructure of maritime, air, rail and road transport in the Russian Arctic implies an intensive build-up of systematic fundamental and applied research in the interests of studying and developing the Arctic, considering the extreme natural and climatic features of the region. Scientific support for development of transport systems involves a system-analytical consolidation of the efforts of experts of various geophysical and related areas, such as geomagnetism [6; 7], seismology, climatology, geotectonics, geoinformatics, etc. Effective intellectual accounting and generalisation of the obtained interdisciplinary results are provided through system analysis.

In this paper, the authors intend to focus on several important geological and geophysical results. Each of them individually and all of them on the whole are of critical importance and require undoubted consideration for the purposes of operation and development of transport infrastructure in the Russian Arctic. The first section presents the results of assessment of the negative impact of space weather on operation of modern railway signalling electronics, power supply, and positioning and navigation accuracy. The second section presents new results on the study of large geological structures and sedimentary basins. The latter may be associated with hydrocarbon deposits, as well as other important geophysical characteristics of the Arctic lithosphere. The third section provides new important information about the seismic activity of the Russian Arctic. The fourth section contains the results in the field of geoinformatics, obtained by integrating new data in a single environment in three listed areas. This opens up the possibility of complex processing, system analysis and visualisation of the obtained geophysical results. The conclusions are presented in the final section of the article.

Scientific research, which has become the subject of this article, is a new direction in the field of operational reliability of transport systems. The most pressing issues for transport – reliability and safety, have been repeatedly considered in various aspects in many publications of the *World of Transport and Transportation* journal. But the influence of geophysical factors on sustainable functioning of transport systems, a systematic analysis of their impact on the



transport infrastructure in the Arctic are presented for the first time.

RESULTS

1. Influence of space weather on functioning of transport and auxiliary engineering systems at the high latitudes of the Russian Federation

1.1. The impact of geomagnetic activity on failures in operation of railway signal automation

Space weather is mainly determined by solar flares, coronal mass ejections, high-speed plasma flows from solar holes that cause geomagnetic storms and substorms. The total amount of energy released during a medium-intensity magnetic storm is about 1400 GW, which is almost twice the capacity of all US power plants. Long-distance infrastructure networks, such as railways located at high latitudes, are affected by geomagnetic disturbances [8; 9]. During geomagnetic storms, the Earth's magnetic field can change rapidly and strongly over time, which provokes the appearance of an electric potential difference of up to several volts per kilometer, which in turn leads to the appearance of geomagnetically induced currents (GIC) in extended conductors. GIC can have a significant impact on operation of engineering systems. From a railway safety point of view, the most important systems that can be affected by GIC are signalling and traffic control systems [10]. During strong geomagnetic disturbances, cases of short-term (1–2 minutes) false occupancy of tracks are observed, which can be repeated for 3–4 hours [11]. The occurrence of signal anomalies is explained by induced currents in the earth during strong geomagnetic storms. Under these conditions, the natural electric field is strong enough to reduce the operating voltage across the relay. Depending on the direction of the GIC in the rails, both a false red light can light up when the track is free (any direction of GIC), and a false green light can light up when it is occupied (GIC with the opposite sign). Of course, the false green light is the most dangerous.

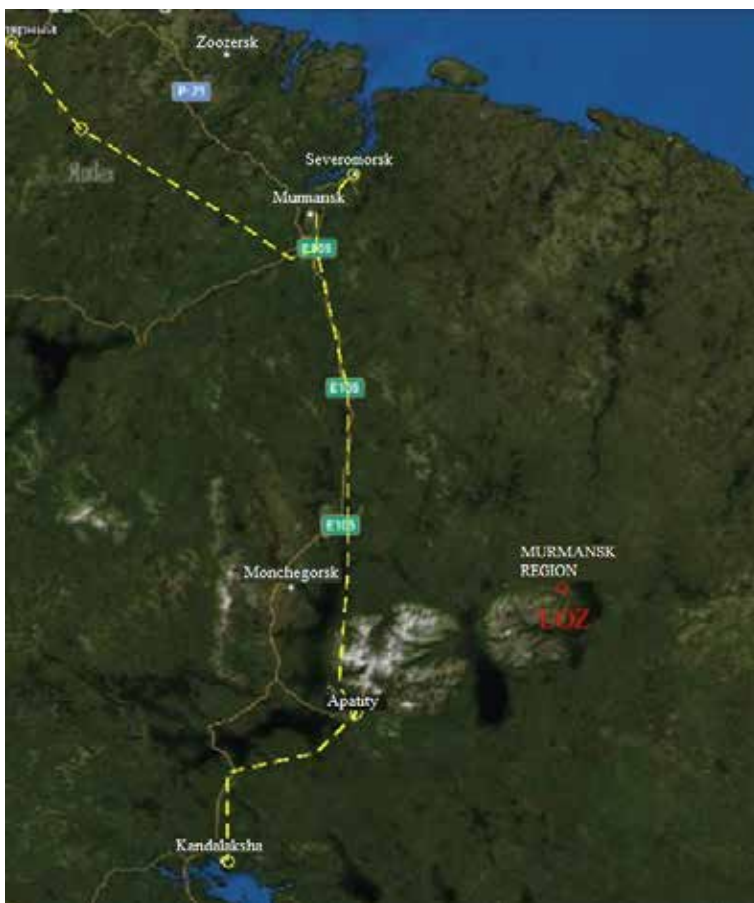
Historically, the first reported event associated with a railway signalling failure was the New York Railroad Storm on May 13, 1921 [12]. A storm of exceptional strength occurred in the fourth year after the maximum of the 15th solar cycle [13]. The prelude of this magnetic storm was a double flash on the limb of the Sun, visible even to the naked eye [14]. As an example of

modern incidents, let's take a storm in July 1982, when failures in operation of railway automation were noted in southern Sweden [15]. The magnetic storm of July 13–14, 1982 developed against the background of a decline in the solar cycle and reached a maximum of $Dst = -325$ nT. During development of the disturbance on the Swedish Railways, there were problems with light signalling: the signal traffic light switched between red and green light for no apparent reason.

In Russia, studies of the relationship between anomalies in operation of railway signalling and geomagnetic disturbances began relatively recently [16]. So, in [10; 17; 18] the statistical relationship between the level of geomagnetic activity and duration of failures in operation of automation systems of the East Siberian Railway in 2004 were studied. It was shown that the total daily duration of anomalies not associated with mechanical damage and meteorological causes on all sections of the road varies in accordance with development of a geomagnetic storm. This duration increases three times when the peak of geomagnetic activity is reached and correlates with the local index of geomagnetic activity. Thus, during strong storms, an increase in the number of disruptions is observed even at middle latitudes.

When analysing failures in operation of signalling systems on the Northern Railway [11], it was revealed that almost every strong geomagnetic storm out of 16 analysed was the cause of anomalies in operation of signal automation. The distribution of registered anomalies per local time slots obtained in the work is consistent with known distributions of the periods of GIC development [19; 20]. Failures in operation of automation systems, in particular, false alarms of traffic lights, were associated with induction of an electric field on rails across the track, which could cause an imitation of a passed locomotive. Analysing failures in operation of the signal automation of the Northern and Oktyabrskaya Railways for 2009–2010 (the 23rd cycle of solar activity), the authors of [21] found that anomalies in operation of automation systems develop almost synchronously and in close connection with excitation of significant geoelectric fields.

To clarify the regularities in manifestation of the impact of geomagnetic disturbances on operation of railway automation and to find ways to limit the impact, it seems appropriate to study



Pic. 1. The considered section of Oktyabrskaya railway (yellow dotted line) and the location of Lovozero magnetic station (IGA code LOZ, red) in Murmansk region [prepared with participation of the authors].

in detail anomalies in operation of automation and signalling systems in sections of railway networks located primarily in the Arctic and subarctic zones. In this regard, an extensive archive of log records of logged failures in operation of railway automation was analysed at the section of Oktyabrskaya railway from the station Kandalaksha (67.15° N) to the station Nickel-Murmansky (69.4° N) for 2001–2006 (Pic. 1). The archive contained information on more than 1800 records, and such a volume of information about failures was analysed for the first time [22].

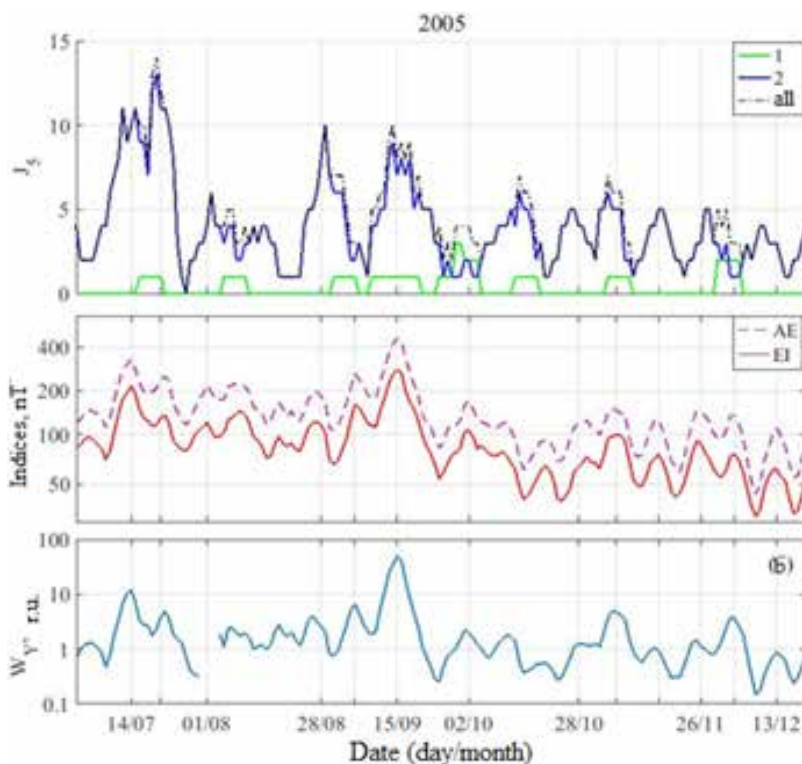
In the archive, for some events, the reason was indicated, for some – not. The reasons indicated in the reports and records of the railway services, as a rule, were associated with breaks, shocks, and mechanical breaks in cables, with meteorological reasons (ice and sand getting into the turnout switches), with intervention of unauthorised persons, that is, they were obviously not caused by geomagnetic factors. For a thorough statistical analysis, the entire archive

was divided into the following three categories of events:

1. Periods without failures lasting more than 1 day.
2. Failures without an obvious external cause.
3. Failures with an indication of the cause (most often mechanical damage, meteorological reasons or interference by unauthorised persons).

It was a priori assumed that failures with no apparent external cause (Category 2) were more likely to be caused by space weather disturbances. Interruption periods were compared with different types of geomagnetic disturbances using four independent statistical tests based on different principles. Geomagnetic disturbances were estimated using the geomagnetic indices of auroral activity AE and interplanetary magnetic cloudiness EI, as well as the spectral density of Pc5 type geomagnetic pulsations recorded at the nearby Lovozero magnetic observatory (IGA code LOZ, Murmansk region, Pic. 1). The analysis showed that the probability of occurrence of failures increases with the level of geomagnetic





Pic. 2. Frequency of failures of category 1, 2 and events of all three categories (upper graph), AE and EI geomagnetic indices (middle graph), and spectral density of Pc5-type geomagnetic pulsations recorded at LOZ magnetic station for the period July-December 2005 [prepared with participation of the authors].

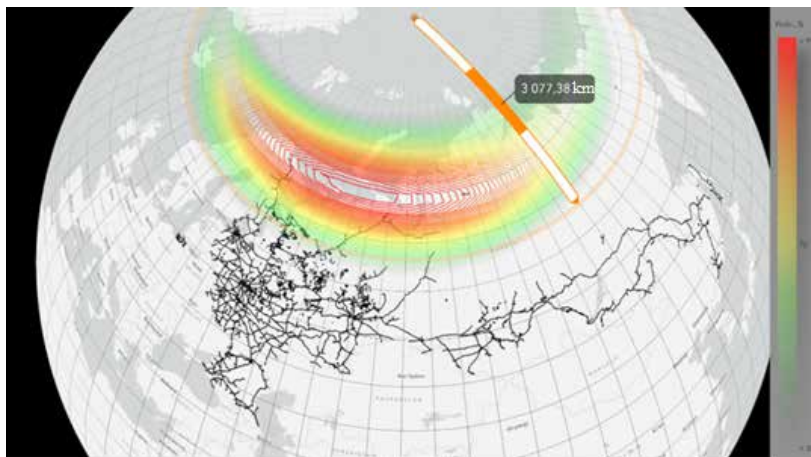
activity. At the same time, integral values of geomagnetic indices over 2–4 days turn out to be significant, which corresponds to the average duration of geomagnetic storms. Another important result was that category 3 failures, the cause of which was clearly indicated in the archive, do not show differences in the statistical relationship with geomagnetic activity. Possible explanations for this can be both technical factors associated with inaccuracies in the description of the causes, and physical factors associated with the indirect influence of geomagnetic activity through the weather. Pic. 2 shows graphs of variability of geomagnetic activity and the frequency of failures of railway signal automation for July-December 2005. The graph clearly shows the coincidence of all maxima of auroral activity and local geomagnetic disturbance with the maxima of frequency of anomalous events.

The analysis of the GIC amplitude (e. g., [23; 24]) and failures on the railway shows that the source of the strongest disturbances is the auroral oval, namely, the region of discrete precipitation, which gravitates closer to the equatorial boundary of the oval. It is important to note that the stronger

is the geomagnetic disturbance, the lower are the latitudes to which the auroral zone shifts. Thus, the critical problem is the possibility of predicting the position of the oval and auroral precipitation. In this regard, an online service for short-term forecasting of intensity and spatial distribution of auroras was developed (Pic. 3). The input parameters are real-time data from interplanetary satellites located at L1 libration point, which provides a forecast with a horizon of 30–70 min. The developed system is based on the empirical mathematical model OVATION-Prime [25], which establishes statistical relationships between the parameters of the solar wind, the interplanetary magnetic field, and auroral particle fluxes. It has been shown that the proportion of confirmed aurora forecasts is more than 86 % [26; 27].

1.2. Exposure of global satellite navigation systems in the auroral region to geomagnetic activity

Transport relies heavily on availability of other critical infrastructures such as power, signalling, communications and navigation



Pic. 3. An example of modelling the position of the auroral oval and the intensity of auroras online (<http://aurora-forecast.ru>).

systems for operations and positioning, and previous research has shown that these technologies can be disrupted during space weather. Due to introduction of digital technologies in railways, such as big data [28], service 4.0 [29], the Internet of things (IoT) [30], cyber-physical systems [31], there may also be failures in operation of other digital electronic equipment [32]. Thus, technological advances have increased the risk of adverse effects caused by a solar storm. Let us dwell in more detail on the impact of space weather on satellite navigation systems.

Global navigation satellite systems (GNSS) use signal transmission in the range from units to tens of GHz from a magnetospheric satellite. The region of the magnetosphere where the maximum number of navigation satellites is concentrated includes the geostationary orbit (distance to the center of the Earth $6,6R_E$, where R_E is the radius of the Earth) and lower orbits. The satellite electronics itself is exposed to fast charged particles, primarily the electrons of radiation belts, and can be damaged during sharp increases in electron fluxes. But the number of navigation satellites is currently so high that damage or even loss of one of the satellites can only slightly affect the quality of navigation in most areas. Nevertheless, the question of the increase in the error associated with a decrease in the number of satellites for a particular receiving point requires a separate study, as well as modelling the loss of a signal from several satellites simultaneously under conditions of extreme increases in the electron flux. Modern navigation systems are based on the use of several systems, including GNSS: GPS (USA),

GLONASS (Russian Federation), Galileo (European Union), BeiDou/Compass (PRC).

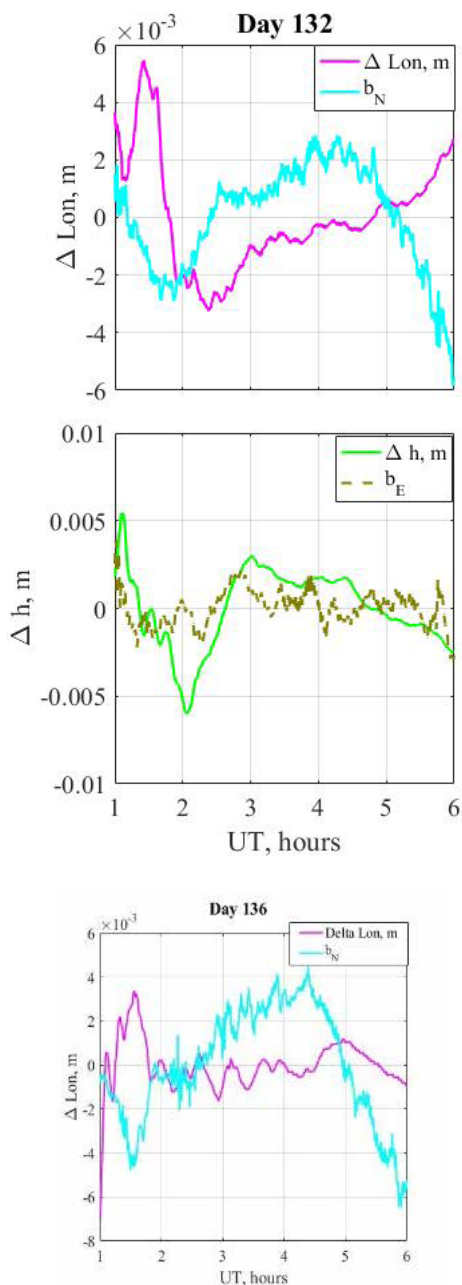
In the autonomous navigation mode, the positioning error is a few meters. Let us consider the physical mechanisms of the influence of space weather disturbances on accuracy of the navigation signal reception. With all the variety of effects, they fit into the following main groups:

1. Deterioration of the signal-to-noise ratio due to natural noise in the operating range of the emitter.
2. Damage to the transmitting equipment by streams of fast charged particles.
3. Disturbances on the propagation path from the transmitter to the receiver, primarily due to ionospheric inhomogeneities.

The source of the first group of distortions is the increase in the flux of solar radio emission during flares. Damage to equipment on magnetospheric satellites whose orbit lies inside the Earth's magnetosphere is associated with increases in fluxes of fast charged particles of both solar and magnetospheric origin. The maximum amplitudes of ionospheric inhomogeneities are associated with the zone of auroras and, above all, their discrete forms.

Thus, possible cosmic sources of errors in operation of navigation equipment are associated with solar flares, solar proton, and electron events, increases in fast electron fluxes in the magnetosphere, and powerful auroral disturbances. The effects associated with charged particles and ionospheric inhomogeneities are most pronounced during strong magnetic storms, when not only the disturbance amplitudes increase, but the disturbance maximum shifts to the mid-latitude region [33].





Pic. 4. Examples of consistent positioning error variations in longitude (top) and altitude (bottom) at SVTL base station (60.50 N, 29.0 E, Leningrad region) and magnetic field variations at NUR station (60.50 N, 25.50 E, Finland) during the time of the main (left) and recovery (right) phases of the magnetic storm on May 12, 2021. The amplitude of the magnetic field variations is normalised by the amplitude of the displacement variations [performed by the authors].

The sun is a source of electromagnetic radiation in a wide range of wavelengths, including the frequency range of GNSS signals (1–2 GHz). This leads to a deterioration in the signal-to-noise ratio when receiving a signal from the satellite. Statistical analysis of the effect of solar flares on the signal-to-noise ratio showed

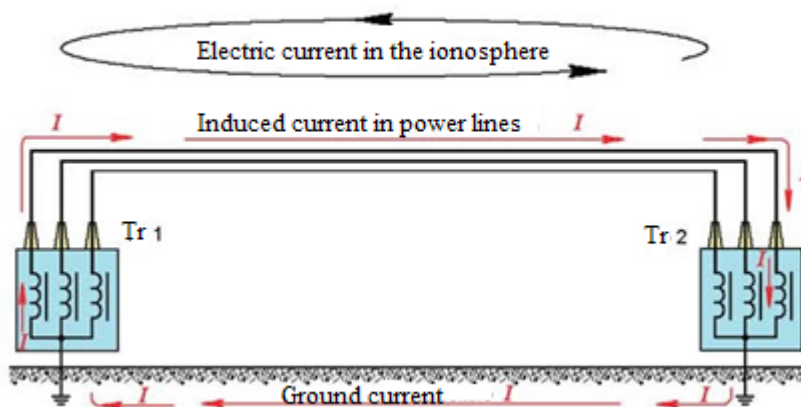
that receivers operating at L2/L5 frequencies are the most vulnerable, and the signal quality at L1 frequency changes little [34]. At the same time, an increase in the number of satellites for this type of interference does not lead to a significant improvement in the situation, since an increase in noise associated with a flare affects all visible satellites simultaneously [35]. A significant improvement in the signal-to-noise ratio occurred due to an increase in the power of the useful signal on new generations of satellites, which makes it possible to maintain operability for flares with a radio flux exceeding 20000 units, which are observed from 1 to several times a year, depending on the phase of the solar cycle [34]. A comparative analysis of the effect of flares in 2011 and 2017, performed in [36], showed a significant weakening of the effect of solar radio flares for new, more powerful systems.

To test the hypothesis of the effect of geomagnetic activity on geopositioning accuracy, we used data from GNSS base stations in auroral and subauroral latitudes. The time resolution was 30 s. Standard primary processing made it possible to compensate for most of ionospheric disturbances. For base stations, the number of satellites in all cases was 15 or more. To test the impact on accuracy of geopositioning, 4 groups of days were selected according to the types of geomagnetic disturbances, for which the following codes were used:

1. lack of disturbance.
2. geomagnetic storms.
3. auroral substorms of high intensity.
4. solar radio flares.

To control the low magnetic activity (code 0), we considered days satisfying the following conditions: the absence of solar radio flares, the absence of magnetic storms with $Dst < -50$ nT and missing the 4-day window before the storm, and the absence of auroral disturbances with $AE > 100$ nT. For each disturbance, the most probable geographic zone (minimum and maximum latitudes and longitudes) of the maximum effect was determined by its type and onset time. In total, 38 events with code 0, 10 events with code 1, 38 events with code 2, and 5 events with code 3 were selected for 2020–2023.

The analysis of the effect of space weather disturbances on time scales from several minutes to several hours showed that even for a base station, after applying the differential correction algorithm [37], in the apparent longitudinal and



Pic. 5. Scheme of formation and flow of GIC in power lines [compiled with participation of the authors].

vertical displacements determined from the GNSS, variations remain in the range of periods of 5–20 minutes, coinciding in frequencies with geomagnetic field variations at the nearest magnetometric station. The amplitudes of these variations for base stations vary within a few centimeters (Pic. 4).

To use the results of signal analysis at the base station in real applications, it is necessary to solve the following tasks:

1. Consideration of the difference between the actual number of satellites in place and at the base station.

2. Obtaining data with a higher temporal resolution to assess the possibility of applying them to a moving object (for example, rolling stock).

3. Exclusion of the differential correction method used in standard data preprocessing in the GNSS network, since it is aimed at geodesy problems and maximally suppresses variations within a day, which gives inconsistent results on different time scales (between days 0.1–10 m, within a day $<10^{-2}$ m).

1.3. Impact of space weather on electricity supply

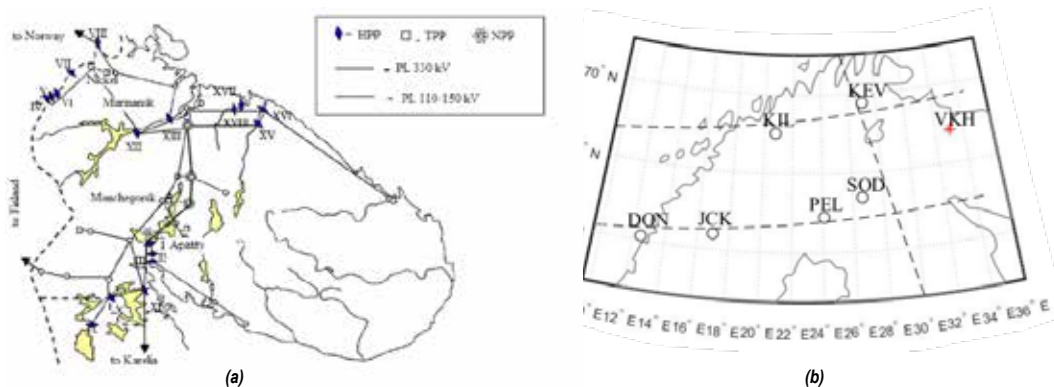
Variations of geoelectric currents induced in the surface layers of the earth's crust are closed through grounded energy systems, causing the appearance of GIC [38; 39] (Pic. 5). In turn, GIC leads to voltage drops, overheating of power transformers and loss of reactive power in high-voltage power lines [40]. Currently, GIC have become a constant threat to high-tech societies and pose a serious threat to regional high-voltage

electrical networks, many of which cross national borders [41]. In order to transmit large amounts of energy over long distances, more and more extended power lines are being built. However, such lines are particularly susceptible to large GIC. This circumstance makes electrical networks more and more susceptible to space weather disturbances.

The dependence of the railway sector on the electricity grid represents a critical vulnerability due to its direct impact on the railway network, but a power outage can also affect other systems in the station. Other railway equipment that may also be susceptible to GIC are roadside cables, telecommunications and line circuits, standby systems, batteries, condition monitoring systems, point circuits in switching [42].

When studying the excitation of GIC in real high-voltage lines, an important factor is continuous recording of excited currents in operating networks. In Russia, there is a system of continuous registration of GIC in the main line «Northern Transit», passing from the middle latitudes to the Arctic zone. The system has been operating for ten years, and the obtained data on development of GIC at various levels of geomagnetic disturbances make it possible to estimate the possible values of GIC during extreme disturbances. The maximum GIC values in the transformer neutral reached 140 A at the northernmost substation Vykhnodnoy during the event on June 29, 2013. The extremely large value of current was determined by the nature of the disturbance, the train of Ps6 type pulsations during development of a strong substorm [43], and the configuration of connection of power





Pic. 6. Scheme of the Northern Transit power line on the Kola Peninsula: (a) location of its northern substation Vykhnodny (VKH), where GIC measurements are carried out; (b) location of nearby geomagnetic stations on the territory of Russia and Finland [compiled with participation of the authors].

equipment at the substation during the indicated period. With development of significant GIC in the neutral of the transformer, quality of electricity deteriorates significantly due to generation of harmonics of the fundamental frequency. It is the harmonics that can cause disturbances in the thermal regime of the transformer, disrupt operation of protective relays, and interfere with operation of equipment in networks of electricity consumers. To influence operation of the transformer, it is sufficient to excite GIC with an intensity of only a few A.

The calculation of possible GIC levels during typical and extreme magnetic storms, which can be used by network operators to take the necessary measures to reduce the risk of catastrophic consequences, is an extremely urgent task. Solving the problems of reducing the risk of occurrence and reducing the consequences of natural disasters does not come down simply to the «engineering» application of the results of space physics for calculating GIC in technological systems, but also requires elucidation of the physical nature of some magnetospheric-ionospheric phenomena. An effective prediction of GIC intensity and spatial distribution requires a thorough study of various types of trigger disturbances in the geomagnetic field. Magnetic storms are the most studied source of GIC. We conducted a study of GIC generated outside the storm, which showed that the most effective triggers are such auroral disturbances as isolated substorms and geomagnetic pulsations. To do this, we analysed simultaneously the data of the GIC registration system in the neutral of the transformer on the Northern Transit power line (Kola Peninsula,

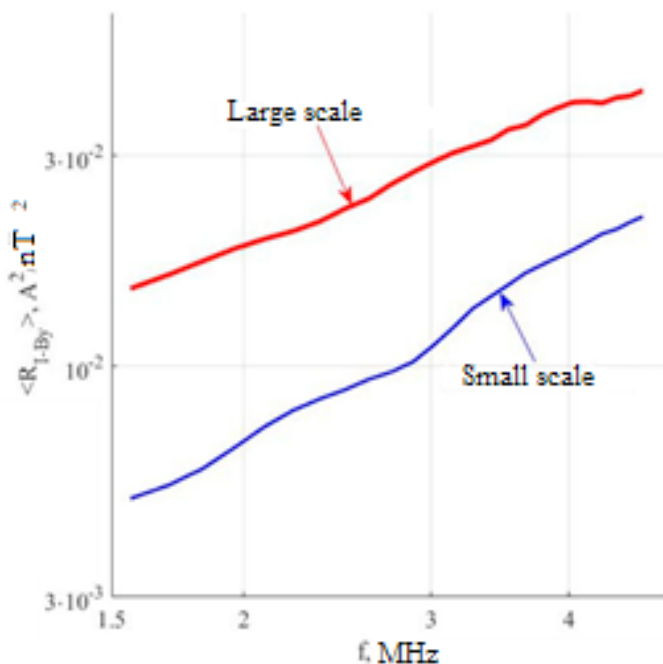
Republic of Karelia) (Pic. 6 (a)) and geomagnetic measurements obtained at nearby geomagnetic stations in Russia and Finland (Pic. 6 (b)), for 2014–2018.

As a result of the research, the following factors were identified that affect the GIC-efficiency of pulsations:

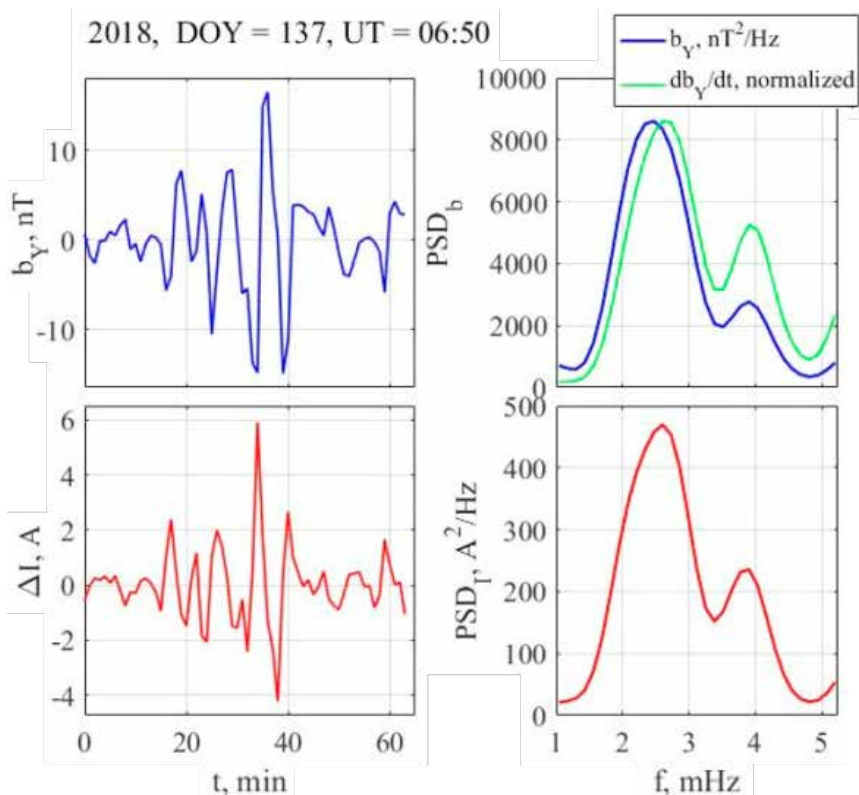
1. Spatial scale.
2. Shape of the spectrum.
3. Polarisation.

The analysis of data from several geomagnetic stations makes it possible to study spatial distribution of the pulsation field. It was shown that the same amplitude and frequency of perturbations can lead to different effects due to different spatial scales of pulsations [44]. The effect of spatial scale on GIC efficiency is clearly illustrated in Pic. 7. It can be seen from the picture that the ratio of GIC amplitude to the pulsation amplitude increases with an increase in the spatial scale of the pulsation field, which preserves the amplitude and frequency.

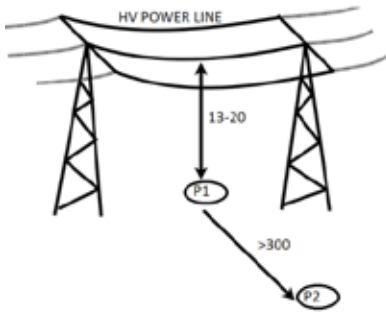
It was also shown that the spectral composition of ULF pulsations is a significant efficiency factor in generation of GIC [45]. In this regard, multiharmonic pulsations turn out to be more efficient than single-harmonic ones – in case of the former, the ratio of the GIC amplitude to the pulsation amplitude is one and a half times greater. Pic. 8 shows the spectra of the eastern *Y*-component of the pulsations and its time derivative at the top right. The shape of both spectra has a pronounced leading edge, which ensures the efficiency of GIC generation. In this case, the spectrum of the generated geoinduced current (the graph on the bottom right) has an identical shape. It is also important that disturbances in



Pic. 7. Dependence of the ratio of the GIC amplitude to the pulsation amplitude on its frequency for different spatial scales of pulsations [44].



Pic. 8. An example of an exact match between the temporal shape (left) and spectra (right) of geomagnetic field pulsations (top) and GIC (bottom). The top right graph shows the perturbation spectra of the Y-component of the geomagnetic field and its time derivative m [45].



Pic. 9. Scheme of remote registration of GIC in power lines by differential method. P1 and P2 are the points of location of magnetometers, the distances are given in meters [compiled by the authors].

the geomagnetic field and in the GIC also coincide in time (graphs on the left).

The analysed intervals of Pc5/Pi3 pulsations recorded simultaneously in the geomagnetic field and GIC showed that for a power line extended in the meridional direction, the relationship between the spectral power of geomagnetic pulsations and GIC is stronger for the latitudinal (Y) than for the meridional (X) component of the geomagnetic field. This translates into both a higher correlation coefficient and a larger linear regression coefficient. In other words, the transverse polarisation of pulsations with respect to the strike of a power line has the greatest effect on generation of GIC in it [21].

Based on the analysis of three selected factors, it follows that, at high latitudes, off-storm pulsations with insignificant amplitudes are an important source of potentially dangerous GIC with amplitudes of several tens of A. Indeed, as follows from Pic. 8, the maximum range of pulsation amplitudes of only 25 nT leads to generation of GIC with an amplitude of 10 A. Recall that 25 nT is the characteristic

amplitude of the quiet daily variation of the geomagnetic field at middle latitudes. The duration of the investigated pulsations can reach several hours. Such a long-term effect of GIC of ~ 10 A on the power supply system is statistically more dangerous than single bursts of GIC of ~ 100 A in the neutral that occur during storms and substorms.

1.4. Prototype of autonomous gradient installation for remote registration of GIC

Direct measurements of current in the neutral of transformers are technically complex, require high costs and physical connection to the transformer equipment, which is not always possible. In this regard, remote methods for detecting quasi-direct currents in high-voltage power lines are extremely promising and in demand for estimating the GIC value. This method is currently being widely tested and implemented around the world. The first experiments were carried out in 2016 in South Africa [46], and then the measuring installations based on this method were installed and tested in the UK, Spain, Portugal, and other countries [47–50]. The idea of the method is to install two three-component magnetometers in close proximity to power lines. The first magnetometer is installed under the line, and the second – at a distance of 100 to 300 meters (Pic. 9).

The calculation of the difference between the records of magnetometers makes it possible to eliminate natural perturbations and obtain variations in the total magnetic field vector from direct current in the power line. Applying the Biot-Savart law, which determines the induction vector of the magnetic field generated by a direct electric current [51], the direct current (GIC) in a power line is calculated by the formula:



(a)

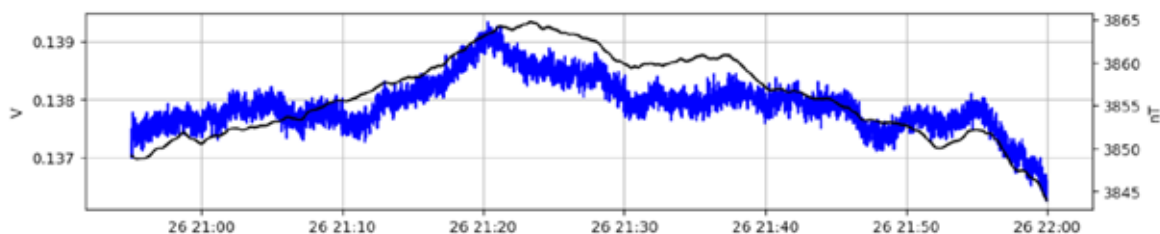


(b)



(c)

Pic. 10. Observatory tests of sensors: field measurements of the field gradient (a), installation in the variation pavilion together with a standard high-precision vector magnetometer (b), one of two magnetometers of the gradient installation (c) [authors' photo].



Pic. 11. Recordings of the eastern Y-component of the geomagnetic field with a gradient setup (blue [composite] curve, scale on the left, V) and an observatory magnetometer (black [single-line] curve, scale on the right, nT) [prepared with participation of the authors].

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R},$$

where B – measured field, R – distance to current conductor.

We are developing an installation based on the described method. Sensors based on a microstrip resonator with a thin magnetic film were chosen as magnetometers. At the magnetic observatory of the State Center of the Russian Academy of Sciences «Klimovskaya», Arkhangelsk region [52; 53], three-component assemblies of these sensors were tested (Pic. 10).

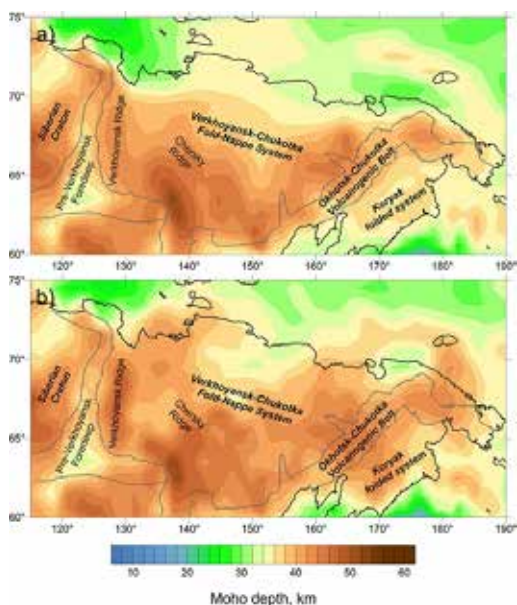
A comparison of these sensors with the standard set of magnetometric equipment of the observatory confirmed that sensitivity and accuracy of sensors are sufficient to measure the currents that occur during the flow of medium and strong geomagnetic disturbances (Pic. 11). As mentioned above, potentially dangerous GIC are characterised by short-period variations in the horizontal components of the magnetic field from 10 nT. Currently, a field version is being developed for testing in real conditions on the Northern Transit power line (Republic of Karelia and Murmansk region), equipped with a GIC measurement sensor through the transformer neutral. A necessary step will be calibration of the gradient installation for normal current in the electric power system under study.

2. Study of large geological structures and sedimentary basins based on a comprehensive analysis of geological and geophysical data

The importance of studying sedimentary basins in the Russian Arctic is due to the large reserves of minerals (primarily hydrocarbons) in this region. The research results provide new information for prospecting and exploration of oil and gas fields in the continental part and on the shelf in the Russian Arctic. Search, exploration, and development of hydrocarbon

deposits require development of the necessary transport infrastructure in the region at a sufficient level. This section presents the results of studying large geological structures, sedimentary basins and geoinformation products built on their basis. Undoubtedly, these results should be considered in development and design of new transport routes in the Russian Arctic, which are necessary for implementation of projects both at the stage of exploration of deposits and at the stage of their operation.

The Mohorovichich (Moho) section is one of the most important boundaries in the bowels of the Earth, which is characterised by strong changes in all physical parameters, therefore, knowledge of the depths of the Moho section is extremely important for many geophysical models and for understanding the structure and dynamics of the lithosphere. Direct data on the Moho depth can only be obtained from seismic



Pic. 12. Original Moho depth map (top) and corrected Moho map (bottom), depth from sea level [61] [prepared with participation of the authors].

surveys, the coverage of which is highly heterogeneous, and in the eastern part of the Russian Arctic, which is an extremely inaccessible territory, they are practically absent. A new Moho map was constructed for the eastern part of the Russian Arctic (region 60–75° N, 110–190° E) [54]. This region was chosen as the least studied within the Russian Arctic, and therefore is of particular interest. The map is based on the joint inversion of various geophysical fields, primarily the field of residual anomalies and vertical gravity gradients. The original map [55] was corrected according to these fields with additional restrictions from several seismic profiles. The new Moho model (Pic. 12(b)) has been compared in detail with the original model (Pic. 12(a)) and demonstrates some fundamental features that were absent before.

Thus, in the new model, under the Verkhoyansk Ridge, there is a lithospheric root 47 km deep compared to the relatively small Moho depression in the original model. A significant difference was found in the Moho depth (from 25–40 to 38–45 km) in the northern continental part of the study area and on the shelf. We suggest that this thickening of the Earth's crust is related to underplating due to plume activity that took place earlier. New information was also obtained on the Moho depth in the water area of the Chukotka microcontinent and under the location of Anadyr-Koryak fold system.

The structure of sedimentary basins was studied in the same East Asian Arctic zone. As a result of calculation of gravity decompensation anomalies, a new sedimentary thickness model for the eastern sector of the Russian Arctic [56] was obtained, which demonstrates new significant details about the structure, area, and density of sedimentary basins in comparison with the results of geological studies. In particular, new data on the thickness of the sedimentary cover were obtained for Zyryansk, Anadyr, Chaun, and other sedimentary basins (Pic. 13).

For the circumpolar Arctic, a new model of geothermal heat flow was obtained based on inversion of seismic and magnetic data [57]. To construct a new heat flow map for the region under study, the catalogue of the International Heat Flow Commission and two theoretical predecessor models [58; 59] were used. Pic. 14 shows a comparison of compilation of the original models (Pic. 14(a)) with the new model (Pic. 14(b)). The new map reveals some features that have not been previously identified – in

particular, zones of increased heat flow in the Bering Strait, the Chukchi Sea and a residual anomaly in the Labrador Sea region associated with the Paleogene-active Mid-Labrador Ridge. An increase in heat flow in the ancient rift zone that separates Eastern and Central Siberia is also visible.

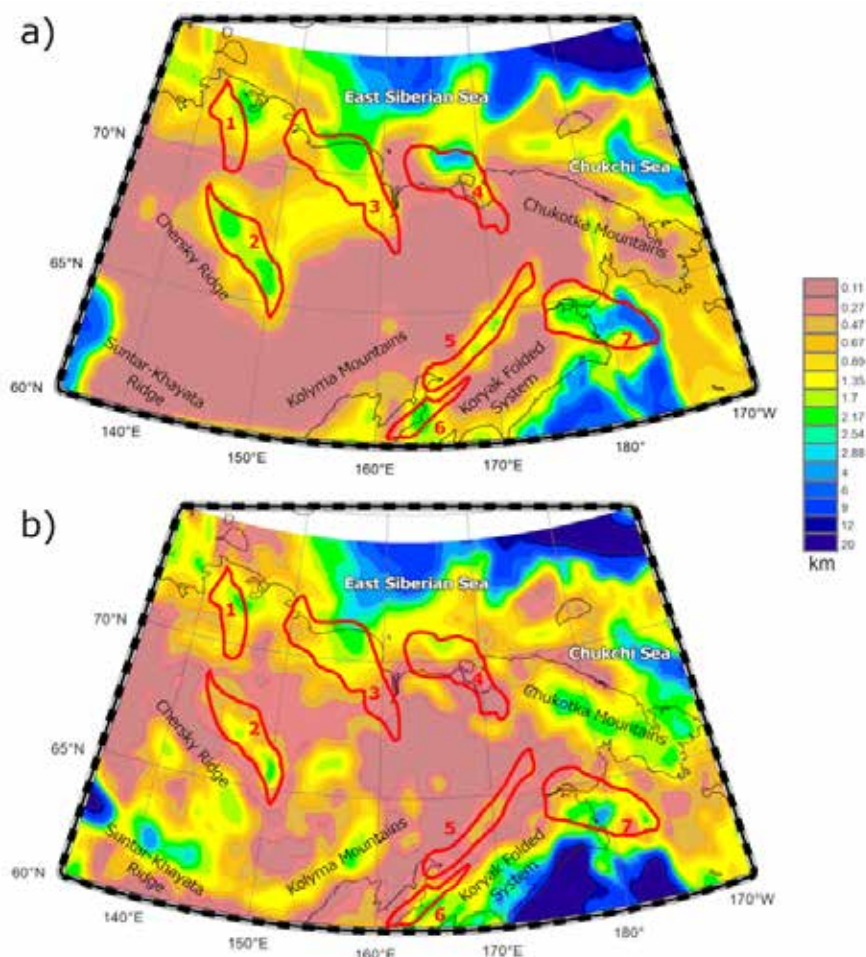
Also, models of the elastic characteristics of the lithosphere were built – flexural stiffness (Pic. 15 (a)) and effective elastic power (Pic. 15 (b)) for the lithosphere throughout the Arctic zone of Russia. In this study, we used the method for determining the elastic parameters of the lithosphere [60]. It is based on cross-spectral analysis of data on the gravitational field and near-surface load. An important addition compared to previous works was the use of not only topography data as a surface load, but also the density inhomogeneities of the sedimentary cover. A refined model of these inhomogeneities was obtained in [56].

As a result of the work done, a collection of geophysical fields for the Russian Arctic was published [61], which includes the above-described results of modelling the Arctic lithosphere, as well as a number of data collected from open sources (for example, sections of seismic tomographic models of the Arctic before the division between the upper and lower mantle). In the course of research in this area, the following digital data arrays were additionally obtained:

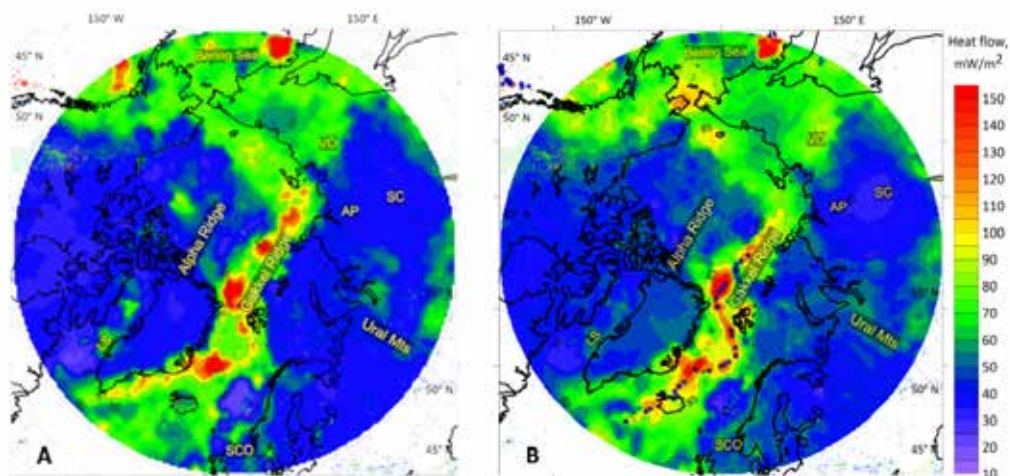
- Gravitational effect of the crust and upper mantle (gravitational field and its vertical gradients).
- Residual «mantle» gravity anomalies similar to vertical gradient anomalies and residual topography (1°x1° resolution).
- Density model of the consolidated crust (1°x1° resolution).
- Corrected upper mantle model: mean density values for the Moho layers –75 km, 75–125, 125–175, 175–225, 225–275 and 275–325 km on 1°x1° grids.
- Changes in density due to variations in temperature and variations in mantle composition.

3. Assessment of seismic activity in the Russian Arctic

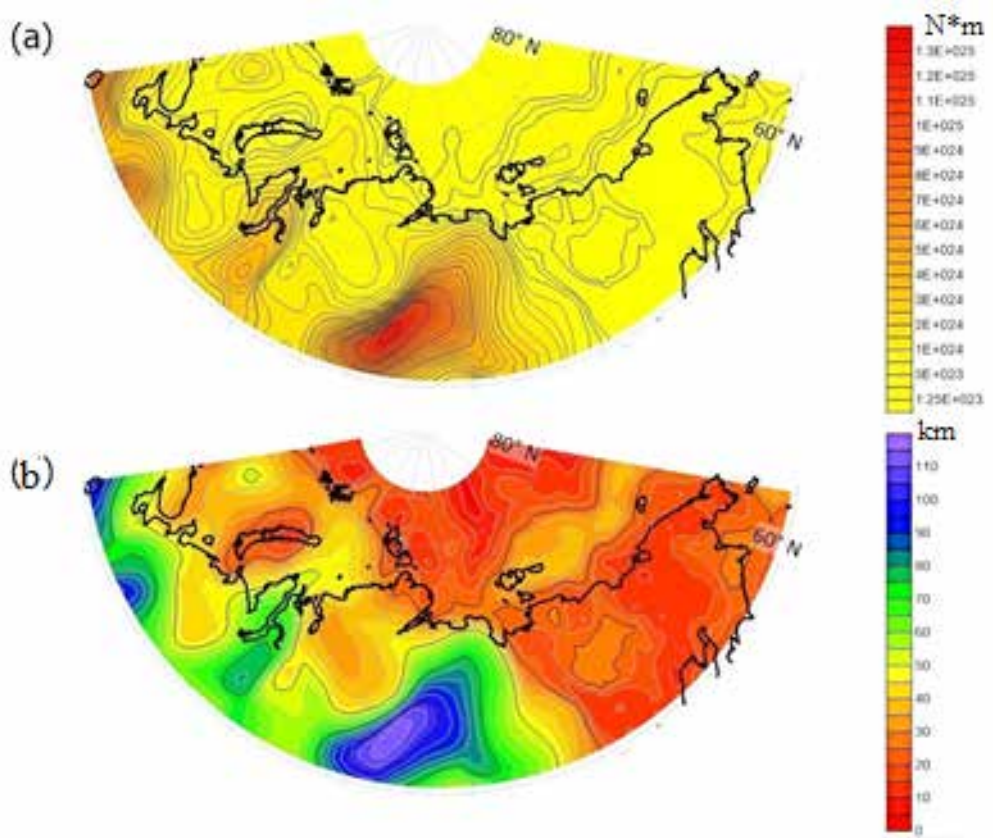
The Russian Arctic today is a poorly studied region in terms of seismic hazard assessments. Estimates for different parts of this region in some cases differ significantly from the real situation [62]. At the same time, accounting for



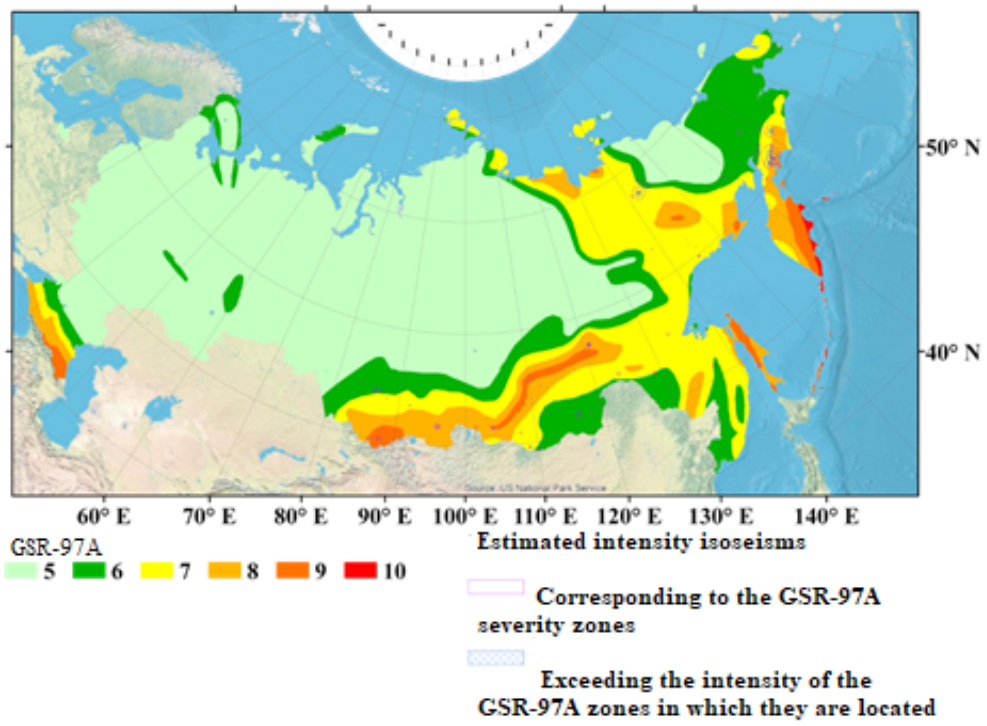
Pic. 13. The original sedimentary cover model (top, a) and the new sedimentary cover model obtained using the decompensation anomaly approach (bottom, b)). Red contours indicate the analysed sedimentary basins: 1 – Tastakhsky, 2 – Zyryansky, 3 – Primorsky, 4 – Chaunsky, 5 – Penzhinsky, 6 – Pustoretzky, 7 – Anadyrsky [61] [prepared with participation of the authors].



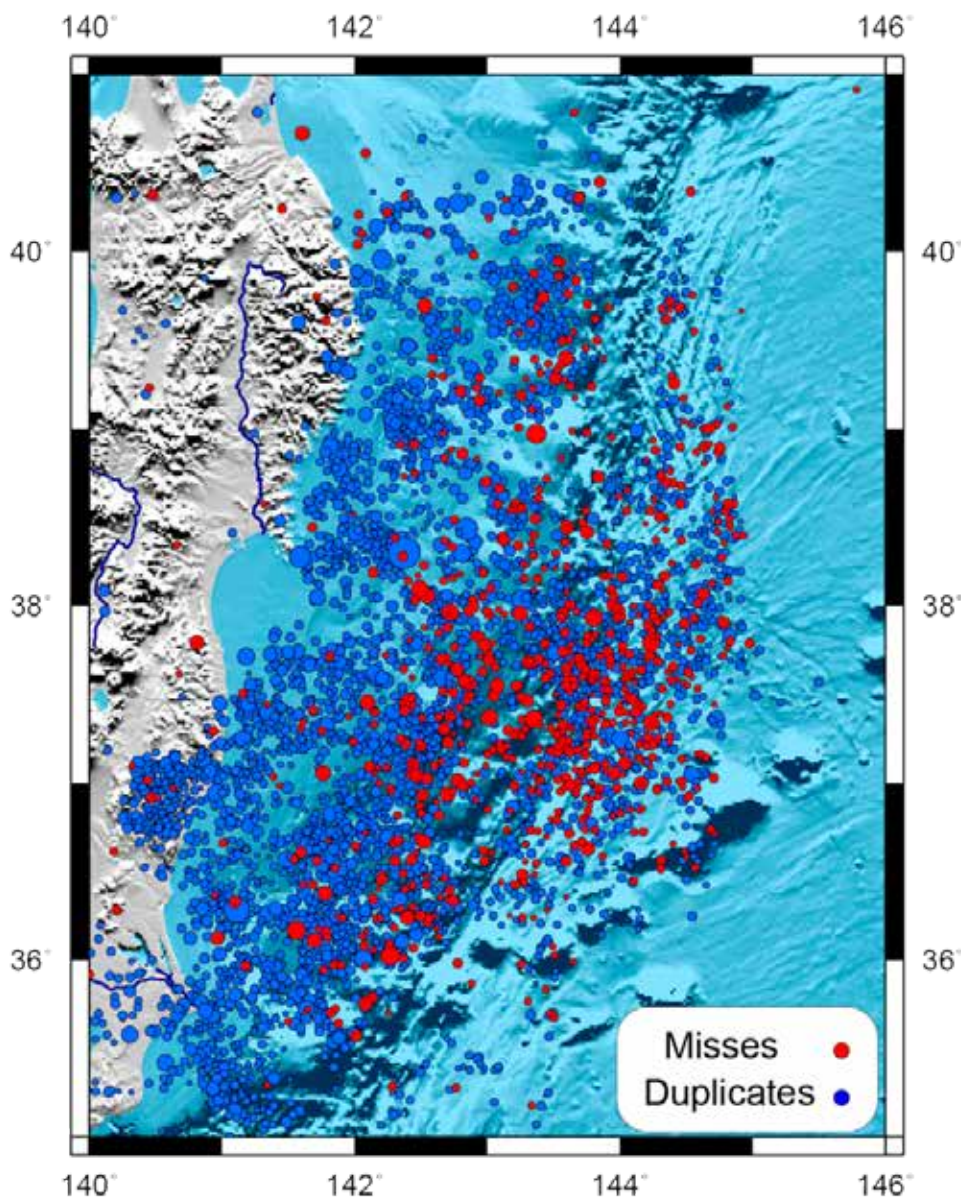
Pic. 14. The original (left, A) and new (right, B) heat flow models for the circumpolar Arctic. Abbreviations denote: SC – Siberian Craton; AP – Anabar Plateau; VO – Verkhoyansk orogen; SCO – Scandinavian Caledonian orogen; LS – Labrador Sea [prepared with participation of the authors].



Pic. 15. Maps of flexural stiffness (top) and effective elastic power (bottom) of the lithosphere of the Arctic zone of the Russian Federation [prepared with participation of the authors].



Pic. 16. GSR-97A map and calculated theoretical isoseisms [62].



Pic. 17. Epicentre map of the ANSS catalogue of the aftershock sequence of the 2011 Tohoku earthquake. Events missing in the JMA catalogue are shown in red [developed with participation of the authors].

seismic activity plays a critical role in operation, planning and development of transport systems in the region. In this regard, the task of creating a system-analytical complex for recognising signs of places of possible occurrence of dangerous seismic and other geodynamic events in the Arctic and calculating seismic hazard and seismic risk for given territories and objects is relevant. Particular attention is paid to the study of such linear objects as railways, highways, power lines and pipelines.

As an initial step in recognising zones of possible occurrence of strong earthquakes in the

AZRF, a numerical comparison of the maps of the General Seismic Zoning (GSR) [63] was carried out with the impact from earthquakes that actually took place after publication of the maps. A comparison was made of the area of zones of expected intensity on the GSR-97A map with the area of isoseisms from actually occurred earthquakes. The study showed that the isoseism area is, on average, an order of magnitude smaller than expected according to the GSR-97A map (Pic. 16). Thus, in most regions of Russia, assessment of seismic hazard on average can be overestimated by at least 10 times. This



observation is especially important for the Russian Arctic, where, against the background of a very weak actual seismic impact, significant areas of the Kola Peninsula, the Novaya Zemlya and Severnaya Zemlya archipelagos, the New Siberian Islands, the Taimyr Peninsula, as well as the north of Yakutia and Chukotka are assigned to zones with an intensity of 6 and higher. In the article [62], ways were proposed to improve seismic hazard assessments necessary for a systematic analysis of geophysical processes in the Arctic.

In the process of preparing the most complete catalogue of earthquakes in the Russian Arctic, the authors and their colleagues identified significant differences in the catalogues of the International Seismological Centre (ISC) and the Single Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences (EGS RAS). In this regard, the ISC catalogue was supplemented with events from the EGS RAS catalogue and other Russian local sources. For this, an original algorithm for combining earthquake catalogues was created, the main task of which is to identify the resulting duplicates and separate them from aftershocks. The algorithm is based on the authorial modification of the nearest neighbour method [64; 65] for takes. Its ideological basis is the fact that, unlike aftershocks, duplicates do not have a causal relationship. For events from two catalogues, a one-to-one correspondence is built, after which the classification of earthquakes into unique and duplicates is performed using the Euclidean metric of the «Frolich type». Thus, the developed algorithm makes it possible to automatically combine any number of earthquake catalogues [66].

The efficiency of the algorithm was first demonstrated by combining the ANSS (USGS) and JMA (Japan Meteorological Agency) catalogs of the aftershock sequence of the 2011 Tohoku earthquake (Pic. 17). Later in 2021–2022 the algorithm was developed and modified for its direct application to AZRF data.

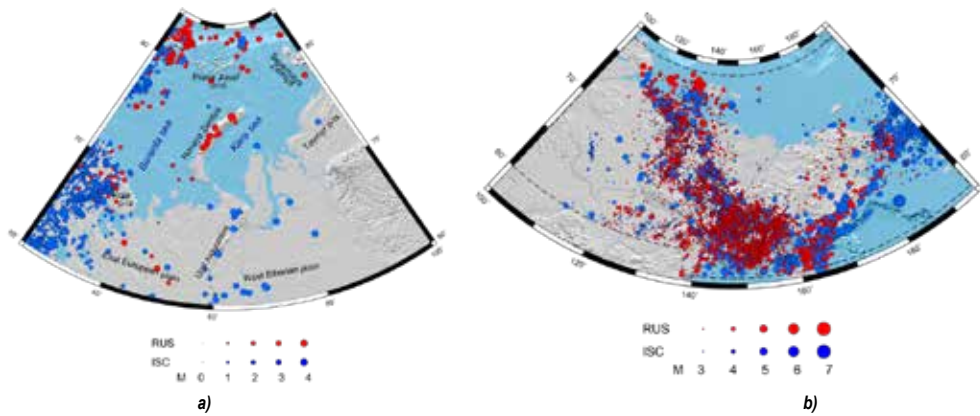
As a result, for the first time in 2022, the most complete integrated catalogue of earthquakes in the eastern part of the Russian Arctic was created [67] and two catalogues, in their unification covering the entire western part of the Russian Arctic: the integrated catalogue of the western sector of the Russian Arctic and the catalogue of the Gakkel Ridge [68]. All three authorial catalogues are provided with their own single magnitude scale. The catalogues of the western

sector of the Russian Arctic and the Gakkel Ridge are divided into two sets ordered by time, since their single magnitudes are mutually incompatible.

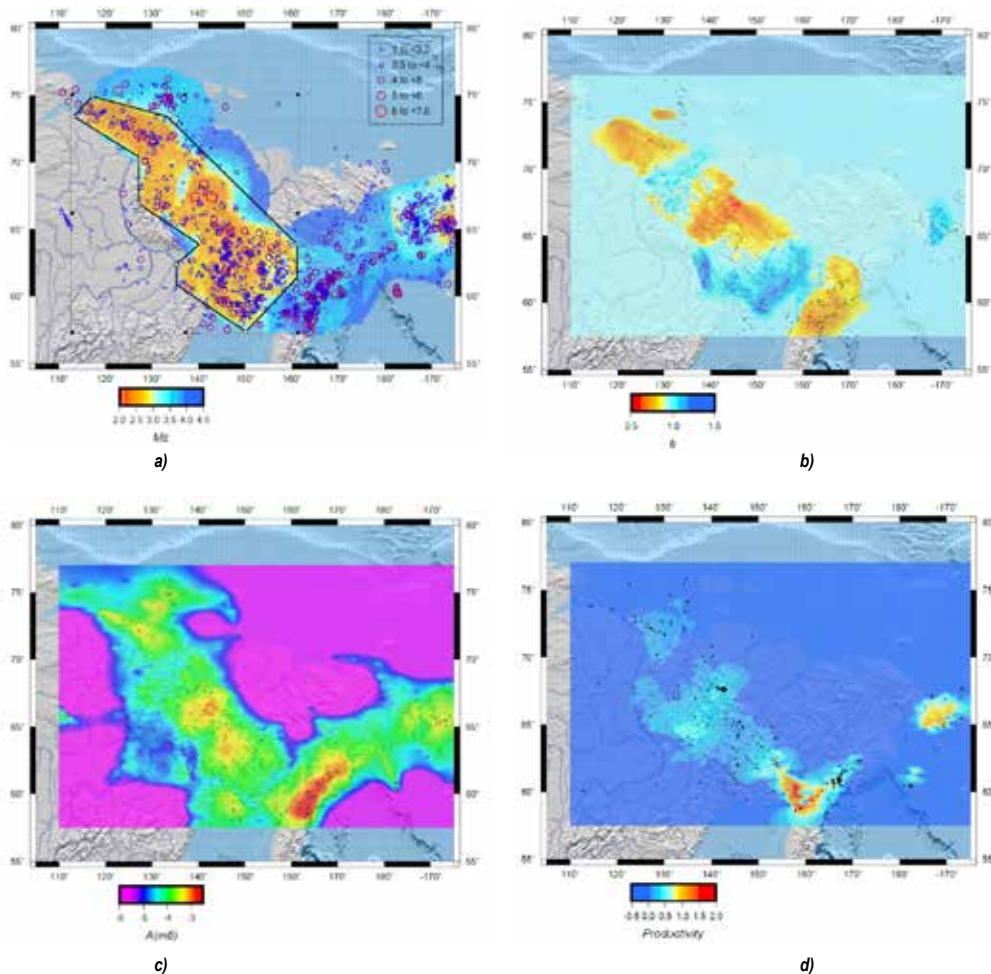
Pic. 18 shows the events from the created combined catalogues for the western and eastern sectors of the Russian Arctic, which integrate all available seismic data from ISC, Russian regional catalogues of the EGS RAS and a number of other sources. The catalogue of the eastern sector of the Russian Arctic (Pic. 18(b)) contains 23254 events for 1962–2020, of which 7781 are from ISC and 15473 are from Russian sources [69]. For the created catalogue of the western sector of the Russian Arctic (Pic. 18 (a)) the work was carried out to identify and remove explosions and other events that are not earthquakes. For the period 1998–2020, when all such events were deleted with a high degree of certainty, the catalogue contains 2126 entries. In total, for the period 1963–2022, the catalogue contains information on 4629 seismic events. The Gakkel Ridge catalogue contains about 17000 events.

Further studies were related to the spatial assessment of seismic activity using data from the created earthquake catalogues. As a measure of energy, the authorial modified magnitude indicated above was used. For the eastern sector of the Russian Arctic, the values of the coefficients of the Gutenberg-Richter law of repeatability were calculated on a regular grid with a step of 0.1° in latitude and longitude. Pic. 19 (a) shows a map of local values of the representative magnitude. Based on these data, the boundaries of the region were determined, in which the value $M_c = 3.0$ can be taken as a representative magnitude. In the rest of the region, this value is $M_c = 4.0$.

The nearest neighbour method was used to divide the catalogue into background and dependent events. Further evaluation of seismicity parameters was carried out using the catalogue of background events. On a grid with a step of 0.1° in latitude and longitude, the seismic activity parameter $a(m4) = \log_{10} v$ was calculated, where v is an estimate of the number of earthquakes with a magnitude $M \geq 4.0$, calculated considering the fractal dimension of distribution of epicentres. As a result, maps of variations in the slope of the recurrence plot (b -value) (Pic. 19 (b)) and the seismic activity parameter $a(m6) = a(m4) - 2b$ (Pic. 19c) were constructed. According to the method [70], the productivity of each earthquake was calculated



Pic. 18. Maps of the epicentres of the combined catalogues of the Russian Arctic: (a) the western sector for the period 1998–2020; (b) Eastern sector for the period 1962–2020. Blue indicates earthquakes from the ISC catalogue, red indicates events from Russian and other sources [compiled with participation of the authors].



Pic. 19. Estimation of seismic activity in the eastern sector of the AZRF according to the integrated earthquake catalogue of the AZRF [prepared with participation of the authors]:

- (a) – map of the magnitude of the full registration of M_c for the period 1982–2020, built by the multiscale method (the polygon marks the area where earthquakes with $M \geq 3.0$ are used to calculate the seismicity parameters, earthquakes with $M \geq 4.0$ are used in the rest of the territory);
- (b) – variations in the slope of the recurrence plot (the values of b – value are tied to the average position of the earthquakes in the sample; $R = 300$ km, $N_{min} = 50$ events; in places of low seismic activity, the regional value of the slope of the recurrence plot $b = 0.924$ is used);
- (c) – seismic activity $a(m6)$ on a logarithmic scale (variations in seismic activity for any magnitude level are calculated in accordance with the local value of the slope of the recurrence graph $a(M) = a(M_c) - b(M - M_c)$);
- (d) – average productivity in circles with radius $R = 300$ km, $DM = 1$ (black circles mark the earthquake epicentres used to calculate productivity).

in the band of magnitudes $DM = 1$. As a result, in circles with a radius of $R = 300$ km, the values of average productivity were calculated and mapped (Pic. 19 (d)). This made it possible to determine regional estimates of parameters of the Omori-Utsu law, according to which a GIS-oriented database was formed.

To model the seismic process in the region under study, it is useful to use a synthetic catalogue of earthquakes. Such a catalogue is a new artificially created set of analogues of seismic pseudo-events generated by analogy with the records of a real catalogue. A synthetic catalogue reproduces the main properties of a real catalogue and is generated for an arbitrary time interval. We have developed a method for constructing a synthetic catalogue of earthquakes, which is based on the synthesis of three groups of approaches to assessment of geodynamic hazard. The main idea of the method is the assumption that the Gutenberg-Richter law is fulfilled at the regional level, and possible local deviations are compensated for by averaging over the entire region. Therefore, times and magnitudes of background events in the synthetic catalogue are determined for the entire region, regardless of their location. The parameters of pseudo-events are generated in accordance with the regional law of recurrence, and their location is determined as a vector random variable with a given spatial distribution depending on the magnitude. The distribution is constructed for each magnitude value based on local estimates of the Gutenberg-Richter law.

Another important assumption is that the strongest earthquakes occur in a limited number of zones within the region under consideration. To determine these zones, recognition methods based on a system analysis of the region's earthquake catalogue, FCAZ recognition, were used [71]. The latter study is of great independent importance both for clarifying the seismic zoning of the Russian Arctic and for orienting the planning of construction of high-risk facilities, including highways, sea and river ports, airports, railway, and bus stations, etc.

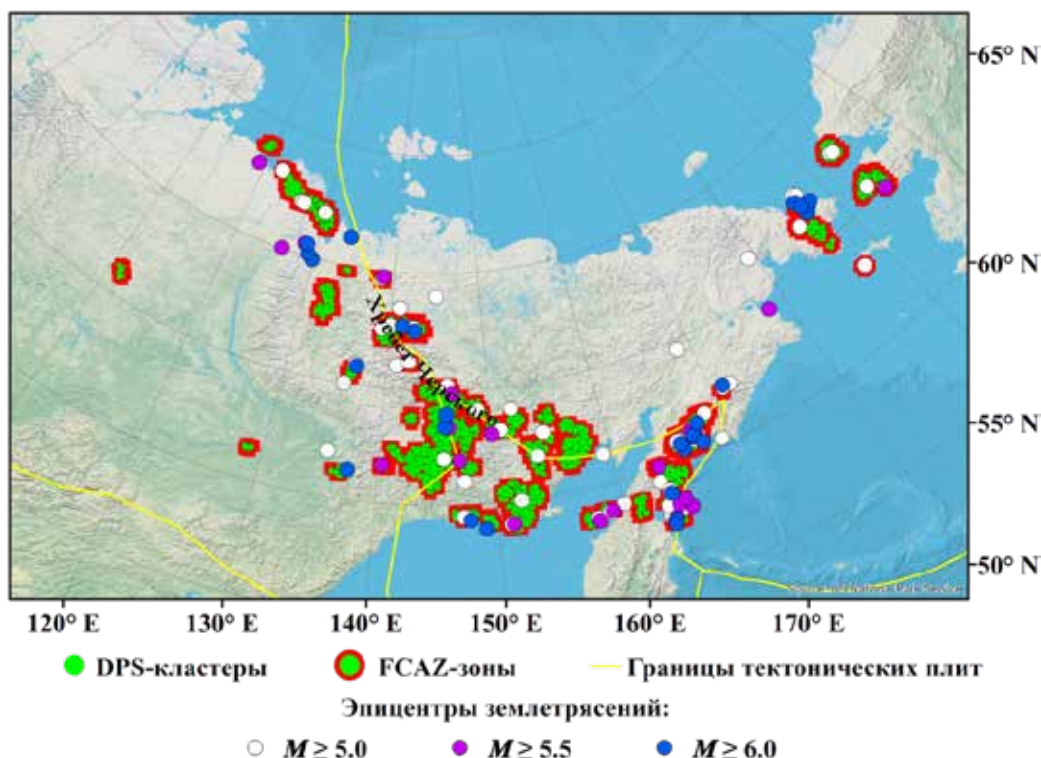
Thirdly, aftershocks make a significant additional contribution to the overall seismicity and seismic hazard. The ETAS model [72] is used as the basis for stochastic aftershock modelling. In this model, the seismic regime is interpreted as a superposition of sequences decreasing in time according to the Omori-Utsu law. The spatiotemporal variant of the ETAS model [73]

considers the power law of decrease in intensity of aftershocks with distance from the epicentre of the main shock. ETAS postulates that the number of aftershocks for earthquakes of the same magnitude is the same. However, the recently established law of earthquake productivity [70] refutes this postulate, at the same time explaining the fact that the intensity of the earthquake flux predicted for future time intervals by the ETAS model is overestimated. The applied method uses the ETAS-e model [70; 74], which additionally considers the law of earthquake productivity. This model corrects the main drawback of the ETAS model [74]. Using this method, a synthetic catalogue of earthquakes was prepared for a conditional period of 1000 years for the eastern sector of the Russian Arctic.

Recognition of the places of possible occurrence of strong earthquakes with $M \geq 5.5$ in the eastern sector of the Russian Arctic was performed using the above-mentioned FCAZ algorithm [69; 75]. Earthquake epicentres from the integrated earthquake catalogue of the Russian Arctic were used as recognition objects (Pic. 18 (b)). The choice of the magnitude threshold, starting from which the epicentres were used as objects of FCAZ-recognition, was carried out on the basis of the analysis of frequency graphs. The recognised FCAZ zones are in good agreement with the location of the epicentres of historical and instrumental strong earthquakes (Pic. 20) and are mainly confined to the boundaries of the Eurasian, North American, and Sea of Okhotsk tectonic plates. In the zone of contact of all three plates and the Sea of Okhotsk with the North American, very large FCAZ-zones were identified, containing half of the strong earthquakes known in the region. FCAZ zones are also recognised within the Chersky Ridge, which is one of the main geological structures in the region. A fairly large number of instrumentally recorded strong earthquakes are known within the boundaries of this ridge [67].

4. Geoinformation support for system analysis of geophysical processes in the Russian Arctic

An effective tool for complex analysis and combined visualisation of new geological and geophysical data obtained about the Arctic region are geographic information systems (GIS). It is important that this provides high-level storage of geographic objects using an object-relational



Pic. 20. FCAZ zones of possible occurrence of earthquakes with $M \geq 5.5$ in the eastern sector of the Russian Arctic and epicentres of earthquakes with $M \geq 5.0$. The map can be recommended for the use as a reference during further construction and operation of transportation roads [developed with participation of the authors].

database management system. The use of modern technologies of geoportals makes it possible to provide interactive online access to the obtained scientific results to a wide range of researchers. High-quality visualisation is a powerful tool in the field of modelling and systems analysis and, as a result, becomes an important part of processing and management of large amounts of data.

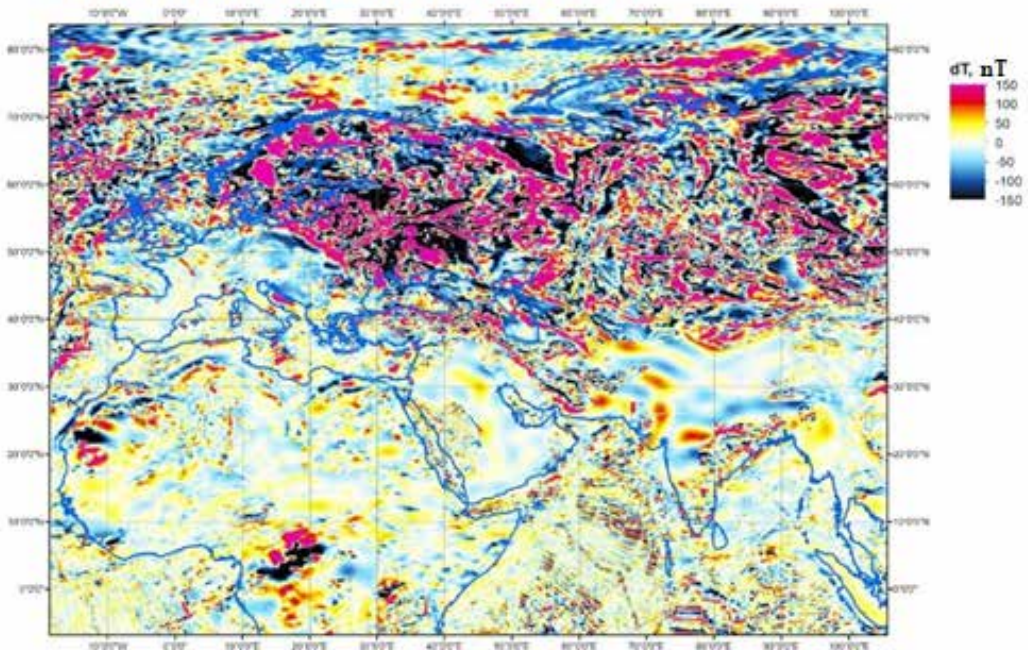
The studies described in the previous sections systematically generate new data in the following major scientific areas: geomagnetism and space weather, the structure of the earth's crust, and seismic activity. As they are received, a common, integrated database of geospatial data on the Russian Arctic is expanding. For example, geothermal heat flow modelling data, calculated as part of the study of the structure of the earth's crust in the Arctic, depth maps of the main geological boundaries (Mohorovichich boundary, upper mantle, sediment bottoms and lithosphere-asthenosphere boundary) were added to the database, which were used in the calculations of this new model, the initial thickness of the sedimentary cover, based on the compilation of these models for water areas and land, the effective elastic thickness of the lithosphere, the

integrated catalogue of earthquakes in the Russian Arctic, and many others.

Any auxiliary geological and geophysical information involved in the course of research is also included in the database. Such data, for example, include data on geology (forecast mineralogical map at a scale of 1:2 500 000, a geological map at a scale of 1:2 500 000, a map of the thickness of the sedimentary cover), geodesy (a topographic map of the Russian Federation at a scale of 1:1 100 000); ETOPO and GEBCO digital elevation models), hydrology (maps of redistribution of snow volumes, temporal variability of snow cover, groundwater runoff, total river runoff, snow stock, river runoff variations, meltwater runoff, potential ice cover, establishment and melting of snow cover), networks geophysical observations (maps of distribution of observatories and stations of geophysical observations), glaciology (maps of the boundaries of permafrost, the degree of glaciation of territories, the thickness of the ice cover, the temperature regime in the permafrost zone), mineral deposits (maps of large and unique mineral deposits), soil science (maps of classes and types of soils), geophysics (maps of the Earth's anomalous magnetic field; earthquake



Anomalous component of the magnetic field, dT_a , nT



Pic. 21. Fragment of the map of the anomalous component of the magnetic field, constructed according to the model [76] with participation of the authors.

epicentres; geoid anomalies; gravity anomalies; depths to the Mohorovichic surface; seismic wave velocities, etc.), biogeography (maps of swampy areas, vegetation, bioclimatic zones and vegetation zones). As an example, Pic. 21 shows GIS data layers on the Earth's lithospheric magnetic field according to the model of field expansion in spherical harmonics up to the 1050 degree [76]. The model was built based on magnetic field measurements from the CHAMP and Swarm satellites, as well as data on near-surface scalar anomalies obtained during local marine and terrestrial surveys of the magnetic field. The final data are presented for the entire planet with a step of $0,1^\circ$ in latitude and longitude. The geodatabase includes information about the anomalous magnetic field and its three orthogonal components. For each of the components there is a variant of the field at a height of 0 kilometres, and recalculated to a height of 5 kilometres.

Additionally, in the specified GIS-repository, the section «Directions for development of the Arctic» was created, containing spatial information about the already created and planned infrastructure facilities of the Russian Arctic. The data layers presented in this section

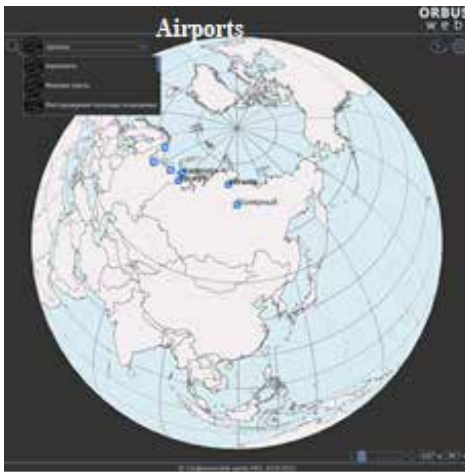
were compiled in accordance with Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2020, N 645 «Strategy for development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035» and include transport facilities (ports, airports, roads, and railways), energy facilities, developing tourist facilities, objects of science and education. Now, the database includes more than 200 layers of geodata in 46 categories.

For wide access to the accumulated data, the Arctic geoportal (<https://arctic-gis.gcras.ru/>) with an extensive user interface was developed and continues to be developed. Among other things, the following tools for interacting with spatial data have been added to it: «Measuring distances», which allows measuring the linear distance between two or more objects, as well as measuring the area of spatial objects; «Coordinates», which allows clarifying the coordinates of an object on the map; «Selection», which allows selecting a specific type of data within one category, and also provides the output of an attribute table containing only the type of data that the user is interested in (Pic. 22).

The concept of interactive spherical visualisations (ISV) is the study of planetary



(a)



(b)

Pic. 23. Reproduction illustrations of ISV «Roads» and «Railways» presented using the ORBUS complex (a), as well as ISV «Airports» and «Seaports» made using the ORBUS Web (b) [provided by the authors].

architecture (a set of directories, files and principles of interaction with them) of the server part of the ISV system was implemented. The created file server organises single access to the content storage system for geovisualisation software technologies. The prototype of the ISV single geographic information system was tested by the ISV client applications developed at the GC RAS: the ORBUS hardware-software complex with a spherical projection screen (Pic. 23 (a)) and the ORBUS Web «virtual globe» web application (Pic. 23 (b)).

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The most active manifestations of geomagnetic disturbances are observed at auroral latitudes [77; 78], therefore, these factors pose a particular danger for safe operation of technological systems in the Russian Arctic,

since the Russian Federation has the longest oil and gas pipelines, power lines and transport routes. Despite the exceptional importance of such studies, the influence of geomagnetically induced currents (GIC) on electric power systems and on the reliability of electrical equipment is still not considered in domestic regulatory documentation. While most space weather studies have focused on the impact on electrical networks, much less attention has been paid to disruption of the railway sector [79], although the mechanism of this impact has not yet been sufficiently studied [80].

At the same time, anomalies in train signalling and control systems associated with this phenomenon have been repeatedly documented [81]. The results presented in this article confirm that geomagnetic activity at high latitudes is a significant cause that controls the occurrence

of failures in operation of railway signal automation [22]. The improvement of the technical base, aimed at ensuring smooth operation of railway signal, is accompanied by an increase in complexity of the technological infrastructure and leads to disappearance of some effects and emergence of new ones. However, the general physical cause of failures in operation of signal automation, associated with excitation of GIC in an extended conductor, cannot be eliminated.

The operation of transport systems also depends on other technologies potentially affected by space weather, such as power supply, communications, positioning, navigation and time synchronisation systems. Since during strong storms the impact of disturbances spreads quite widely and is of a planetary nature, it is necessary to coordinate efforts to predict space weather and develop measures to mitigate direct and indirect impacts of disturbances on systems and services associated with operation of transport systems [42].

The paper demonstrates that statistically weaker, but frequent and prolonged geomagnetic events generate more dangerous GIC, in contrast to rare but strong geomagnetic storms. The key factors affecting the GIC efficiency of these events are their spatial scale, spectrum shape, and polarisation. From the point of view of the negative impact of GIC on power supply systems, the geometry of the power transmission line and its orientation in space are of key importance. So, the greater is the length of a power line, the more intense are the induced currents that arise in it during geomagnetic activity, and this circumstance, of course, must be borne in mind when designing new networks. One solution, which is being applied in a number of Scandinavian countries, could be to split the power lines into shorter segments.

For a full-scale scientific substantiation of prevention of the negative impact of space weather on electric power networks, it is necessary to develop a GIC monitoring network. The paper proposes a promising autonomous installation based on gradient magnetometric sensors, capable of remotely measuring GIC excited in power lines. Based on the results of statistical and correlation analysis, it is shown that remote sensing of GIC in high-latitude power lines by observing geomagnetic disturbances is characterised by a relative error within 1,5 % of the range of GIC values for the study period.

Thus, the introduction of such installations into a high-latitude observing network will make a significant contribution to the development of a system for assessing possible negative effects of space weather and a short-term forecast (for 0,5–1 hour) of the possibility of critical GIC levels. Such a forecast can be used by operators to take the necessary measures to reduce the risk of catastrophic consequences.

Studies of spatial distribution of GIC sources have shown that geographically they gravitate towards the equatorial boundary of the auroral oval, which makes it especially relevant to predict the intensity of precipitation of high-energy particles and the position of auroral oval boundaries. Such a forecast is also extremely important because the stronger is the disturbance, the lower are latitudes to which the equatorial boundary of the oval shifts. For these purposes, an online system was developed (<http://aurora-forecast.ru>) based on the OVATION-Prime empirical mathematical model and GIS technologies, which provides such a forecast with a horizon of 30–70 min and an efficiency of more than 86 %. In addition, the system performs computer simulation of the instantaneous position of the auroral oval and visualisation of spatial distribution of retrospective data. When displayed on a virtual globe, the studied parameters are superimposed on a digital map of main railway lines and other transport systems in Russia.

The long-term and operational forecast of availability of the required navigation characteristics for the period of the helio-geomagnetic disturbance is the most controversial and complex area of GNSS modernisation. The above information shows that extreme space weather factors can cause significant degradation of the quality of GNSS and their functional additions.

The results obtained allow drawing the following preliminary conclusions. The standard procedure for compensating ionospheric disturbances does not completely suppress disturbances associated with geomagnetic variations with periods from minutes to half an hour (geomagnetic pulsations and bays). A possible source of this phenomenon is modulation of the electron density in the ionosphere by charged particle fluxes, which, in turn, are modulated by the field of the MHD wave in the magnetosphere. This effect is height-differential, particle energy-dependent, resulting



in «undercompensation» when using standard techniques for processing the apparent shift in the position of the base station. The effect does not occur for all geomagnetic pulsations of the same amplitude and frequency. To resolve the issue of practical significance of the detected effect and feasibility of further research, it is necessary to analyse variations in apparent displacement of the position of the object, determined by GNSS, taking into account the number of satellites and speed of the receiver, which is close to the real one.

New data on the thickness of the sedimentary cover and the structure of sedimentary basins in the most remote region of the continental Russian Arctic – the northeastern part of the Russian Federation – provide valuable information on the structure and conditions for formation of sedimentary rock strata in the region, including those promising for prospecting and exploration of mineral deposits. First of all, this is important for the search for hydrocarbon deposits on the shelf of the Arctic Ocean, as well as deposits of various mineral raw materials in the continental part of the Russian Arctic – coal deposits (Zyryansk basin), building materials, etc. The presented new models of the Moho section and the elastic parameters of the lithosphere also make it possible to refine data on the geological and tectonic structure of the territory and its development, including formation of mineral deposits in individual geological structures. The heat flow map compiled not only for the Russian Arctic, but for the entire circumpolar Arctic, is informative in terms of assessing the oil and gas content of the Russian Arctic and studying the thermal field of specific geomorphological structures associated with mantle degassing zones. Also, this map is useful for assessing the dynamics of water resources of ice sheets.

The obtained results of assessing the state of the lithosphere (both of the region as a whole and individual structures) are important geological and geophysical information that must be considered when designing and developing transport infrastructure in the Russian Arctic. Maps of the gravity field, the thickness of the sedimentary cover and the structure of sedimentary basins, and elastic parameters of the lithosphere provide comprehensive information about its geological structure, geodynamic conditions, and stress zones. These data are necessary for comprehensive assessment of suitability of the geological environment for design of railways, roads,

airfields, and seaports, as well as pipelines and communication and power lines in the Russian Arctic. The heat flow map is informative in terms of assessing engineering-geological and environmental risks during construction and laying of highways in permafrost areas, as well as for predicting possible sea level changes due to glacier melting, which is important when designing seaports. The results obtained, both in combination and separately, are of high practical importance for development of the Russian Arctic region and its development.

The presented results on assessment of seismic hazard in the Russian Arctic are of strategic importance. The FCAZ-zones constructed for the eastern sector of the Russian Arctic define spatial regions within which the occurrence of epicenters of earthquakes with magnitude $M \geq 5,5$ is possible in the past, present, or future. In the identified zones marked in red-green colour (FCAZ-zones) in Pic. 20, special attention should be paid to safe operation of existing and yet planned new transport routes and facilities. These include the Northern Latitudinal Railway currently under construction in the Yamalo-Nenets Autonomous District. Increased attention in contoured areas should be paid to the seismic resistance of construction of new highways, sea and river ports, airports, railway infrastructures, etc. Special monitoring complexes should be created in the identified seismic zones that will provide reliable communication of the above transport infrastructure facilities with decision-making centres of the Ministry of Transport, Russian Railways, Aeroflot Russian Airlines, and the Ministry of Emergency Situations.

From the point of view of the seismological aspect of the studies performed, it should be noted the unprecedented importance of creating an integrated earthquake catalogue of the Russian Arctic, single in magnitude, implemented in the form of three independent information products: the integrated catalogue of the eastern part of the Russian Arctic, an integrated catalogue of the western part of the Russian Arctic, and an integrated catalogue of the Gakkel Ridge zone. The original method of integrating the catalogues of earthquakes of various agencies, which was created, can be considered as a significant advance in the part of seismology dedicated to the cataloguing of seismic events. The created method of system analysis is a significant contribution to development of geoinformatics.

Over the previous decades, the efforts of industrial organisations, research institutes and

government agencies in Russia and abroad have accumulated significant arrays of spatial geological and geophysical information on the Arctic region. In recent years, this process has been significantly intensified with expansion of the observational network and the launch of specialised spacecraft, for example, the Arktika-M satellite [82]. Modern geoinformation systems allow efficient collection, storage, and intelligent analysis of spatial data in various disciplines in the field of earth sciences (e. g. [83; 84]).

To systematically analyse the impact of geophysical processes on the state and sustainable development of transport infrastructure in the Arctic, geoinformation methods and technologies for collecting, analysing, forecasting and presenting geological, geophysical and climatic data in the region are being developed. To create such a GIS, a client-server approach was chosen, implemented in the form of a thematic geoportal for user interaction with spatial information, a server part that operates the entire system, and a geodatabase that stores spatial information. In this model, the geodatabase combines information from various disciplines in geology, geophysics, and climatology.

In the course of studying the electromagnetic processes of the near-Earth environment and the effects of space weather on technological systems, data from a global high-precision model of the Earth's lithospheric magnetic field were included in the GIS database. Data on the lithospheric magnetic field are used in solving problems of navigation through the physical fields of the Earth. As part of the study of large geological structures and sedimentary basins, based on a comprehensive analysis of the gravity field and other geological and geophysical characteristics, data were collected on the detailed structure and properties of the Earth's lithosphere in the Russian Arctic region. The data collected in GIS reflect the complex dynamic processes taking place in the earth's crust, which must be considered in development of engineering infrastructure in the region. In the course of studies on assessment of seismic and other geodynamic hazards in the areas of promising development of the transport infrastructure of the Russian Arctic, the GIS included the most complete integrated catalogue of earthquakes necessary for spatial assessment of seismic activity.

When creating a GIS for the Russian Arctic, special attention is paid to the study of climatic processes that are critical for development of

transport infrastructure in the region. Based on the data of long-term measurements of main climatic parameters (air temperature near the surface, soil temperature, total precipitation, wind speed near the earth's surface, soil moisture content, air humidity, snow cover thickness, change in the level of inland waters, etc.), relevant thematic maps and diagrams were built in GIS environment. Joint analysis of a wide range of climate data in a GIS environment makes it possible to assess the impact of current climate changes on transport infrastructure facilities (for example, permafrost thawing, increase in flood zones during seasonal floods). Thus, the formed database of spatial data, as well as a wide range of GIS tools for their analysis, is an important tool for assessing negative factors of the impact of various geophysical processes on the development of transport infrastructure in the Russian Arctic.

REFERENCES

1. Gvishiani, A. D., Rozenberg, I. N., Soloviev, A. A., Kostianoy, A. G., Gvozdk, S. A., Serykh, I. V., Krasnoperov, R. I., Sazonov, N. V., Dubchak, I. A., Popov, A. B., Kostianaia, E. A., Gvozdk, G. A. Electronic Atlas of Climatic Changes in the Western Russian Arctic in 1950–2021 as Geoinformatic Support of Railway Development. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, Iss. 9, 5278. DOI: 10.3390/app13095278.
2. Johansson, J., Hassel, H., Cedergren, A. Vulnerability analysis of interdependent critical infrastructures: case study of the Swedish railway system. *International Journal of Critical Infrastructure*, 2011, Vol. 7, No. 4, pp. 289–316. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2011.045065> [limited access].
3. Garmabaki, A. H. S., Marklund, S., Thaduri, A., Hedström, A., Kumar, U. Underground pipelines and railway infrastructure – failure consequences and restrictions. *Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 2020, Vol. 16, Iss. 3, pp. 412–430. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1666885>.
4. Oughton, E. J., Skelton, A., Home, R. B., Thomson, A. W. P., Gaunt, C. T. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. *Space Weather*, 2017, Vol. 15, Iss. 1, pp. 65–83. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001491>.
5. Forte, B., Vani, B. C., Smith, N., Astin, I., Monico, J. F. G., Ruffenach, A., Flintoft, I., Concannon, A., McCormack, L., Koulouri, A. Space weather disruptions to satellite navigation and telecommunications in the case of interdependent services. 2018, poster session presented at 15th European Space Weather Week, Leuven, Belgium.
6. Gvishiani, A. D., Lukyanova, R. Yu., Soloviev, A. A. Geomagnetism: from the Earth's core to the Sun [*Geomagnetizm: ot yadra Zemli do Solntsa*]. Moscow, RAS publ., 2019, 186 p. ISBN: 978–5–907036–43–7.
7. Gvishiani A., Soloviev A. Observations, Modeling and Systems Analysis in Geomagnetic Data Interpretation. Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58969-1 [limited access].
8. Pirjola, R., Kauristie, K., Lappalainen, H., Viljanen, A., Pulkkinen, A. Space weather risk. *Space Weather*, 2005, Vol. 3, Iss. 2, S02A02, DOI:10.1029/2004SW000112.



9. Pilipenko, V. A. Space weather impact on ground-based technological systems. *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, Vol. 7, Iss. 3, pp. 73–110. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>.
10. Kasinskii, V. V., Ptitsyna, N. G., Lyahov, N. N., Tyasto, M. I., Villorresi, G., Iucci, N. Effect of geomagnetic disturbances on the operation of railroad automated mechanisms and telemechanics. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, Vol. 47, Iss. 5, pp. 714–718. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9534019>. EDN: IAQLUJ. Last accessed 03.04.2023.
11. Eroshenko, E. A., Belov, A. V., Boteler, D., Gaidash, S. P., Lobkov, S. L., Pirjola, R., Trichtchenko, L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Advances in Space Research*, 2010, Vol. 46, Iss. 9, pp. 1102–1110. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).
12. Love, J. J., Hayakawa, H., & Cliver, E. W. Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921. *Space Weather*, 2019, Vol. 17, Iss. 8, pp. 1281–1292. DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).
13. Silverman, S. M., Cliver, E. W. Low-latitude auroras: the magnetic storm of 14–15 May 1921. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, Vol. 63, Iss. 5, pp. 523–535 DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00174-7) [limited access].
14. Hapgood, M. The great storm of May 1921: An exemplar of a dangerous space weather event. *Space Weather*, Vol. 17, Iss. 7, pp. 950–975. DOI: [10.1029/2019SW002195](https://doi.org/10.1029/2019SW002195)
15. Wik, M., Pirjola, R., Lundstedt, H., Viljanen, A., Wintoft, P., Pulkkinen, A. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. *Annales Geophysicae*, 2009, Vol. 27, Iss. 4, pp. 1775–1787. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009>.
16. Pilipenko, V. A., Chernikov, A. A., Soloviev, A. A., Yagova, N. V., Sakharov, Ya. A., Kudin, D. V., Kostarev, D. V., Kozyreva, O. V., Vorobiev, A. V., Belov, A. V. Influence of Space Weather on the Reliability of the Transport System Functioning at High Latitudes. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, Vol. 23, Iss. 2, pp. 1–34, ES2008. DOI: [10.2205/2023ES000824](https://doi.org/10.2205/2023ES000824).
17. Ptitsyna, N. G., Tyasto, M. I., Kassinskii, V. V., Lyakhov, N. N., Villorresi, G. Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? Proc. of 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St. Petersburg, 26–29 June 2007, pp. 288–290. ISBN 9781424412693, IEEE # CFP07626-POD [limited access].
18. Ptitsyna, N. G., Kasinsky, V. V., Villorresi, G., Lyahov, N. N., Dorman, L. I., Iucci, N. Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway. *Advances in Space Research*, 2008, Vol. 42, Iss. 9, pp. 1510–1514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015> [limited access].
19. Vorobev, A. V., Pilipenko, V. A., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet and geomagnetically induced currents. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2019, Vol. 5, Iss. 1, pp. 48–58. DOI: [10.12737/szf-51201905](https://doi.org/10.12737/szf-51201905).
20. Vorobev, A., Soloviev, A., Pilipenko, V., Vorobeve, G., Sakharov, Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 3, 1522. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031522>.
21. Sakharov, Ya. A., Yagova, N. V., Pilipenko, V. A. Pc5/pi3 geomagnetic pulsations and geomagnetically induced currents. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, Vol. 85, Iss. 3, pp. 445–450. DOI: <http://dx.doi.org/10.31857/s0367676521030236>.
22. Yagova, N. V., Rozenberg, I. N., Gvishiani, A. D., Sakharov, Ya. A., Garanin, S. L., Voronin, V. A., Pilipenko, V. A., Dubchak, I. A. Study of the influence of geomagnetic activity on functioning of railway automation systems in the Arctic zone of Russia [*Issledovanie vliyaniya geomagnitnoi aktivnosti na funktsionirovanie sistem zheleznodorozhnoi avtomatiki v Arkticheskoi zone Rossii*]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2023, Vol. 13, Iss. 3 [в печати].
23. Chinkin, V. E., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A. Identification of vortex currents in the ionosphere and estimation of their parameters based on ground magnetic data. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020, Vol. 60, Iss. 5, pp. 588–599. DOI: [10.31857/S001679402005003X](https://doi.org/10.31857/S001679402005003X).
24. Chinkin, V. E., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Engebretson, M. J., Sakharov, Ya. A. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, Vol. 212, 105514, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514> [limited access; manuscript is accessible].
25. Newell, P. T., Liou, K., Zhang, Y., Sotirelis, T., Paxton, L. J., Mitchell, E. J. OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels. *Space Weather*, 2014, Vol. 12, Iss. 6, pp. 368–379. DOI: [10.1002/2014SW001056](https://doi.org/10.1002/2014SW001056).
26. Vorobev, A. V., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Vorobeve, G. R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Solar-Terrestrial Physics*, 2022, Vol. 8, Iss. 2, pp. 93–100. DOI: [10.12737/szf-82202213](https://doi.org/10.12737/szf-82202213).
27. Vorobev, A. V., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Vorobeve, G. R. Internet Application for Interactive Visualization of Geophysical and Space Data: Approach, Architecture, Technologies. *Journal of the Earth and Space Physics*, 2023, Vol. 48, No. 4, pp. 151–160. DOI: [10.22059/jesphys.2023.350281.1007467](https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350281.1007467).
28. Thaduri, A., Galar, D., Kumar, U. Railway assets: a potential domain for big data analytics. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 53, pp. 457–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.323>.
29. Kans, M., Galar, D., Thaduri, A. Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. In: Koskinen, K., [et al]. Proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2015). *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2016, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-7_30 [limited access].
30. Jo, O., Kim, Y.-K., Kim, J. Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, Vol. 5, No. 2, pp. 482–490. DOI: [10.1109/JIOT.2017.2749401](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2749401).
31. Thaduri, A., Verma, A. K., Kumar, U. Maintenance of Railway Infrastructure Using Cyber-Physical Systems. In: Kapur, P. K., Singh, G., Klockhov, Y. S., Kumar, U. (eds). *Decision Analytics Applications in Industry. Asset Analytics*. Springer, Singapore, 2020, pp 521–540. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3643-4_41 [limited access].
32. Pirjola, R. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Advances in Space Research*, 2005, Vol. 36, Iss. 12, pp. 2231–2240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.04.074> [limited access].
33. Afraimovich, E. L., Perevalova, N. P. GPS-monitoring of the earth's upper atmosphere. Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS: GU NC RVH VSNK SO RAMN, 2006, 479 p. ISBN 5-98277-033-7.
34. Sato, H., Jakowski, N., Berdermann, J., Jiricka, K., Heßelbarth, A., Banyaš, D., Wilken, V. Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies. *Space Weather*, 2019, Vol. 17, Iss. 6, pp. 816–826. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002198>.

35. Cerruti, A. P., Kintner, P. M., Gary, D. E., Lanzerotti, L. J., de Paula, E. R., Vo, H. B. Observed solar radio burst effects on GPS/Wide Area Augmentation System carrier-to-noise ratio. *Space Weather*, 2006, Vol. 6, Iss. 4, S10006. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006SW000254>.
36. Yasyukevich, Y. V., Yasyukevich, A. S., Astafeyeva, E. I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts. *GPS Solutions*, 2021, Vol. 25, Iss. 2, art. 46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5> [limited access].
37. Bisnath, S., Gao, Y. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future. *GPS World*, April 2009, Iss. 4, pp. 43–50. [Electronic resource]: <https://gge.ext.unb.ca/Resources/gpsworld.april09.pdf>. Last accessed 03.04.2023.
38. Boteler, D. H., Pirjola, R. J., Nevanlinna, H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface. *Advances in Space Research*, 1998, Vol. 22, Iss. 1, pp. 17–27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01096-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01096-X) [limited access].
39. Pirjola, R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, Vol. 28, Iss. 6, pp. 1867–1873. DOI: [10.1109/27.902215](https://doi.org/10.1109/27.902215) [limited access].
40. Uspensky, M. I. Mitigating the impact of geomagnetic storms on the power system. *Izvestia Komi SC UB RAS*, 2017, Iss. 4 (32), pp. 116–122. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32269413&ysclid=iktqioxq3h876970014>. Last accessed 03.04.2023.
41. Gaunt, C. T. Why space weather is relevant to electrical power systems. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 1, pp. 2–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001306>.
42. Krausmann, E., Andersson, E., Russell, T., Murtagh, W. Space Weather and Rail: Findings and Outlook (European Commission, JRC Science and Policy Reports), 2015. DOI: [10.2788/211456](https://doi.org/10.2788/211456).
43. Apatenkov, S. V., Pilipenko, V. A., Gordeev, E. I., Viljanen, A., Juusola, L., Belakhovsky, V. B., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, Iss. 6, e2019GL086677. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL086677>.
44. Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Sakharov, Ya. A., Selivanov, V. N. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, art. 88. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>.
45. Sakharov, Ya. A., Yagova, N. V., Pilipenko, V. A., Selivanov, V. N. Spectral content of pc5–6/pi3 geomagnetic pulsations and their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2022, Vol. 22, Iss. 1, pp. 1–9. DOI: [http://dx.doi.org/10.2205/2021es000785](https://doi.org/10.2205/2021es000785).
46. Matandirotya, E., Cilliers, P. J., Van Zyl, R. R., Oyedokun, D. T., de Villiers, J. Differential magnetometer method applied to measurement of geomagnetically induced currents in Southern African power networks. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 3, pp. 221–232. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015SW001289>.
47. Hübert, J., Beggan, C. D., Richardson, G. S., Martyn, T., Thomson, A. W. P. Differential magnetometer measurements of geomagnetically induced currents in a complex high voltage network. *Space Weather*, 2020, Vol. 18, Iss. 4, e2019SW002421. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002421>.
48. Torta, J. M., Marsal, S., Ledo, J., Queralt, P., Canillas-Pérez, V., Piña-Varas, P., Curto, J. J., Marcuello, A., Martí, A. New detailed modeling of GICs in the Spanish power transmission grid. *Space Weather*, 2012, Vol. 19, Iss. 9, e2021SW002805. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021SW002805>.
49. Watari, S., Nakamura, S., Ebihara, Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan. *Earth, Planets and Space*, 2021, Vol. 73, 102. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3>.
50. Alves Ribeiro, J., Pinheiro, F. J. G., Pais, M. A., Santos, R., Cardoso, J., Baltazar-Soares, P., & Monteiro Santos, F. A. Toward More Accurate GIC Estimations in the Portuguese Power Network. *Space Weather*, 2023, Vol. 21, Iss. 6, e2022SW003397. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003397>.
51. Landau, L. D., Lifshits, E. M. Field theory [Теория поля]. 7th ed., rev. Moscow, Nauka publ., 1988, 512 p. («Theoretical physics», Vol. II). ISBN 5-02-014420-7.
52. Soloviev, A., Dobrovolsky, M., Kudin, D., Sidorov, R. Minute values of X, Y, Z components and total intensity F of the Earth's magnetic field from Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI). ESDB repository. Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. DOI: [10.2205/kli2011min](https://doi.org/10.2205/kli2011min).
53. Soloviev, A. A., Sidorov, R. V., Krasnoperov, R. I., Grudnev, A. A., Khokhlov, A. V. Klimovskaya: a new geomagnetic observatory. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, Vol. 56, Iss. 3, pp. 365–379. DOI: [10.7868/S0016794016030160](https://doi.org/10.7868/S0016794016030160).
54. Kaban, M. K., Sidorov, R. V., Soloviev, A. A., Gvishiani, A. D., Petrunin, A. G., Petrov, O. V., Kashubin, S. N., Androsov, E. A., Milshtein, E. D. A New Moho Map for North-Eastern Eurasia Based on the Analysis of Various Geophysical Data. *Pure and Applied Geophysics*, 2022, Vol. 179, Iss. 11, pp. 3903–3916. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02925-6>.
55. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I. M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R. E., Sergeev, S., Smelror, M. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth-Science Reviews*, 2016, Vol. 154, March, pp. 29–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>.
56. Sidorov, R. V., Kaban, M. K., Soloviev, A. A., Petrunin, A. G., Gvishiani, A. D., Oshchenko, A. A., Popov, A. B., Krasnoperov, R. I. Sedimentary basins of the eastern Asia Arctic zone: new details on their structure revealed by decompensative gravity anomalies. *Solid Earth*, 2021, Vol. 12, Iss. 12, pp. 2773–2788. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-12-2773-2021>.
57. Petrunin, A. G., Soloviev, A. A., Sidorov, R. V., Gvishiani, A. D. Inverse-forward method for heat flow estimation: case study for the Arctic region. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2023, Vol. 22, № 6, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022ES000809>.
58. Davies, J. H. Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, Vol. 14, Iss. 10, pp. 4608–4622. DOI: <https://doi.org/10.1002/ggge.20271>.
59. Lucazeau, F. Analysis and mapping of an updated terrestrial heat flow data set. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, Vol. 20, Iss. 8, pp. 4001–4024. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GC008389>.
60. Kaban, M. K., Chen, B., Tesauero, M., Petrunin, A. G., El Khrepy, S., Al-Arifi, N. Reconsidering Effective Elastic Thickness Estimates by Incorporating the Effect of Sediments: A Case Study for Europe. *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, Iss. 18, pp. 9523–9532. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL079732>.
61. Soloviev, A., Petrunin, A., Gvozdk, S., Sidorov, R. A Set of Geophysical Fields for Modeling of the Lithosphere Structure and Dynamics in the Russian Arctic Zone. *Data*, 2023, Vol. 8, Iss. 5, 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/data8050091>.
62. Shebalin, P. N., Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Skorkina, A. A. Why are new approaches to seismic hazard



- assessment required? *RAS reports. Earth Sciences*, 2022, Vol. 507, Iss. 1, pp. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.
63. Ulomov, V. I., The GSHAP Region 7 Working Group. Seismic hazard of Northern Eurasia. *Annali di Geofisica*, 1999, Vol. 42, No. 6, pp. 1023–1038. DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-3785>.
64. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. Earthquake clusters in southern California. I. Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, Iss. 6, pp. 2847–2864. DOI: <https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>.
65. Zaliapin, I., Ben-Zion, Y. A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophysical Journal International*, 2016, Vol. 207, Iss. 1, pp. 608–634. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw300>.
66. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V., Antipova, A. O. Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When Merging Earthquake Catalogs. *Frontiers in Earth Science*, 2022, Vol. 10, 820277. DOI: 10.3389/feart.2022.820277.
67. Gvishiani, A. D., Vorobieva, I. A., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A. Integrated Earthquake Catalog of the Eastern Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 10, 5010. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12105010>.
68. Vorobieva, I. A., Gvishiani, A. D., Shebalin, P. N., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Skorkina, A. A., Sergeeva, N. A., Fomenko, N. A. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 12, Iss. 12, 7084. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127084>.
69. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Dzeranov, B. V., Kedrov, E. O., Skorkina, A. A., Nikitina, I. M. Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation. *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, Iss. 23, 11990. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122311990>.
70. Shebalin, P. N., Narteau, C., Baranov, S. V. Earthquake productivity law. *Geophysical Journal International*, 2020, Vol. 222, Iss. 2, pp. 1264–1269. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252>.
71. Gvishiani, A. D., Dzeboev, B. A., Agayan, S. M. FCaZn intelligent recognition system for locating areas prone to strong earthquakes in the Andean and Caucasian mountain belts. *Physics of Solid Earth*, 2016, Iss. 4, pp. 3–23. DOI: 10.7868/S0002333716040013.
72. Ogata, Y. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 1989, Vol. 169, Iss. 1–3, pp. 159–174. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90191-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90191-1).
73. Zhuang, J., Ogata, Y., Vere-Jones, D. Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, Vol. 109, Iss. B5, B05301. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JB002879>.
74. Baranov, S. V., Gvishiani, A. D., Narteau, C., Shebalin, P. N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2019, Vol. 19, Iss. 6, ES6003. DOI: 10.2205/2019ES000695.
75. Dzeboev, B. A., Gvishiani, A. D., Agayan, S. M., Belov, I. O., Karapetyan, J. K., Dzeranov, B. V., Barykina, Y. V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, Iss. 17, 7972. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11177972>.
76. Thébault, E., Hulot, G., Langlais, B., Vigneron, P. A Spherical Harmonic Model of Earth's Lithospheric Magnetic Field up to Degree 1050. *Geophysical Research Letters*, 2021, Vol. 48, Iss. 21, e2021GL095147. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL095147>.
77. Soloviev, A. A., Sidorov, R. V., Oshchenko, A. A., Zaitsev, A. N. On the Need for Accurate Monitoring of the Geomagnetic Field during Directional Drilling in the Russian Arctic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2022, Iss. 3, pp. 136–152. DOI: 10.31857/S0002333722020120.
78. Vorobiev, A. V., Soloviev, A. A., Pilipenko, V. A., Vorobieva, G. R., Gainetdinova, A. A., Lapin, A. N., Belakhovsky, V. B., Roldugin, A. V. Diagnostics of aurora presence based on intelligent analysis of geomagnetic data. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2023, Vol. 9, Iss. 2, pp. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-92202303>.
79. Rozenberg, I. N., Gvishiani, A. D., Soloviev, A. A., Voronin, V. A., Pilipenko, V. A. Influence of space weather on reliability of railway transport in the Arctic zone of Russia [Vliyaniye kosmicheskoy pogody na nadezhnost funktsionirovaniya zheleznodorozhnogo transporta v Arkticheskoy zone Rossii]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2021, Iss. 12, pp. 20–26. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zhhbcw&ysclid=lktpuha4x1415913232> [limited access].
80. Petrukovich, A. A., Breus, T. K., Deminov, M. G., Dmitriev, A. V., Krivolutsky, A. A., Petrov, V. M., Pulinets, S. A., Raspopov, O. M., Nagovitsyn, Yu. A., Trishchenko, L. D., Troshichev, O. A. Space weather effects. Geomagnetic disturbances and power supply and wire communication systems. In the book: Plasma heliogeophysics. Monograph: in 2 Vol. [M. A. Livshits et al]; ed. by L. M. Zeleny and I. S. Veselovsky. Moscow, Fizmatlit publ., 2008, Vol. 2, 559 p., pp. 213–219. ISBN 978-5-9221-1041-9.
81. Liu, L., Ge, X., Zong, W., Zhou, Y., Liu, M. Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway. *Space Weather*, 2016, Vol. 14, Iss. 10, pp. 754–763. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016SW001411>.
82. Asmus, V. V., Milekhin, O. E., Kramareva, L. S., Khailov, M. N., Shirshakov, A. E., Shumakov, I. A. The world's first highly elliptical hydrometeorological space system Arktika-M [Pervaya v mire vysokoellipticheskaya gidrometeorologicheskaya kosmicheskaya Sistema «Arktika-M»]. *Meteorology and Hydrology*, 2021, Iss. 12, pp. 11–26. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-12-11-26.
83. Soloviev, A., Khokhlov, A., Jalkovsky, E., Berezko, A., Lebedev, A., Kharin, E., Shestopalov, I., Mandeia, M., Kuznetsov, V., Bondar, T., Mabe, J., Nisilevich, M., Nechitailenko, V., Rybkina, A., Pyatygina, O., Shibaeva, A. The Atlas of the Earth's Magnetic Field. (Eds.: Gvishiani, A., Frolov, A., Lapshin, V.). Publ. GC RAS, Moscow, 2013, 361 p. ISBN 978-5-904509-13-2. DOI: 10.2205/2013BS011_Atlas_MPZ.
84. Soloviev, A. A., Soloviev, A. A., Gvishiani, A. D., Nikolov, B. P., Nikolova, Y. I. GIS-oriented database on seismic hazard assessment for Caucasian and Crimean regions. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, Iss. 5, pp. 52–64. DOI: 10.31857/S020596140003241-6.

Information about the authors:

Gvishiani, Alexey D., D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chairman of the Academic Council of Geophysical Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Rozenberg, Igor N., D.Sc. (Eng), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Vice-rector of Russian University of Transport; JSC NIIAS, Moscow, Russia, i.rozenberg@geosc.ru.

Soloviev, Anatoly A., D.Sc. (Physics and Mathematics), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, director of Geophysical Centre of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Article received 04.11.2022, approved 17.02.2023, updated 26.06.2023, accepted 28.06.2023.

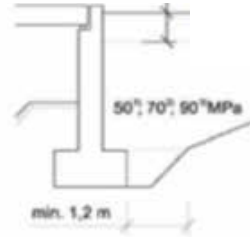


AUTONOMOUS SHIPPING 184

Assessment of basic control algorithms and identification of direction of further research.

COASTAL PROTECTION STRUCTURES 189

Reliability of rock-fill spur dikes and railways.

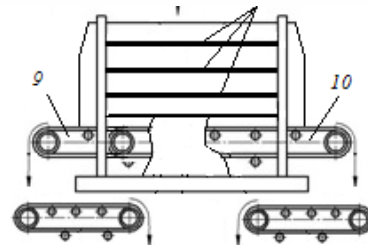


RAILWAY TRACK 197

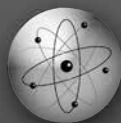
Anisotropic features of superstructure at the approaches of the bridges: modelling and conclusions.

ROAD CONSTRUCTION 206

Project of non-volatile equipment for processing crushed stone.



SCIENCE AND ENGINEERING





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 184–188

Statement of the Problem of Control of an Autonomous Surface Vessel for Inland Waterways



Maxim A. KUDROV



Kirill D. BUKHAROV



Daniil R. MAKHOTKIN



Rafael S. AIVAZOV

**Maxim A. Kudrov¹, Kirill D. Bukharov²,
Daniil R. Makhotkin³, Rafael S. Aivazov⁴**

^{1, 2, 3, 4} Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia.

✉ ¹ kudrov.ma@mpt.ru.

ABSTRACT

Development of autonomous (uncrewed) surface vessels for commercial, industrial, and auxiliary fleet is currently one of the most rapidly advancing transport technologies. The key issue of its implementation is creation of an integrated control system (ICS) of safe navigation of uncrewed surface vehicles (USV) in automatic mode along the route. Then, it is necessary to keep

in mind the features of maritime navigation and inland navigation.

A performed analytical review of basic heading and speed control algorithms allowed revealing the main problems referring to development of an integrated control system for an USV. The statement of the control problem is followed by enlisting directions for further research.

Keywords: water transport, automated control system, uncrewed navigation, navigation.

For citation: Kudrov, M. A., Bukharov, K. D., Makhotkin, D. R., Aivazov, R. S. Statement of the Problem of Control of an Autonomous Surface Vessel for Inland Waterways. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 184–188. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>.

**The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.**

INTRODUCTION

Currently, development of uncrewed surface vessels (USV) for commercial marine industry, industrial and auxiliary fleets is in the focus of attention of leading maritime powers since it will improve safety and efficiency of navigation. The key issue of its implementation is creation of an integrated control system (ICS) of safe navigation of uncrewed surface vehicles (USV) in automatic mode along the route.

Adaptive motion control systems (AMCS) are an advanced class of automated ship control systems. As noted by G. E. Ostretsov and L. M. Klyachko, the authors of several works (including [1; 2]) to which we will refer repeatedly, AMCS can evaluate motion parameters and change control coefficients depending on operating conditions. However, even modern AMCS are used mainly on the open sea, where there are no constraints on manoeuvring and deviating from the course. The problem of automatically controlling a vessel in river waters and when diverging from other vessels under the conditions of waves, currents and wind has not yet been completely solved.

The objective of the study is to formulate basic tasks related to increasing the degree of control automation for development of uncrewed vessels, including those operating on inland waterways, and to determine further directions for research in this area.

RESULTS

Analytical Review of Control Algorithms

Automatic navigation of a vessel from one point to another is a complex control problem which has been stated earlier (for example: [3]) but has now acquired high relevance regarding development of autonomous navigation (for example: [4–7]).

A widely known approach of simplifying this problem is to divide it into two main tasks, which can be considered separately:

- Control of the trajectory and course of the vessel, not considering changes in speed.
- Speed control, which is achieved by changing the operating mode of the main propulsion system.

Proceeding with the described separation, it is possible to reduce the order of the considered system of equations of motion and simplify the procedure for synthesising algorithms.

Course control algorithms

The first autopilot systems operated based on proportional (P) control laws, the formulas of which are presented, for example, in the above-mentioned work [1]. At the same time, as noted

in it, the linear control P-law did not ensure stability of a closed-loop system of automatic course control on medium-tonnage vessels, and the ship could not maintain a given course without yaw with an angle amplitude of up to two degrees. The use of such autopilot systems on large-tonnage vessels was impossible [1].

In this regard, autosteering systems with a proportional-derivative (PD) control law were developed. These systems proved to be more effective when sea is heavy and were equipped with angular velocity sensors, as well as reliable analogue elements. The control law still used the gain k , but also used an additional differential term that allowed more precise control of the ship's heading. The formula for such a control law is as follows [2]:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_1 \cdot \Delta\varphi + k_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

Autopilot developments had the ultimate goal of stabilising the ship's course. For this purpose, an autopilot was developed that uses proportional-integral-derivative control laws (PID), the formulation of which is also contained in [1].

When the steering gear is manually controlled, the rudder is put over no more than 100 times per hour, but in rough seas this number can reach 1400 per hour, which is extremely undesirable.

To reduce overload and cut off high-frequency components of sea waves, a proportional derivative filtered (PDF) control law was developed, which cuts off high-frequency components of sea waves [1; 2].

Then an adaptive motion control system (AMCS) was created with a unit for estimating measured parameters and a «unit for adjusting control coefficients when operating conditions change. Such self-adjusting automatic control systems with autonomous adaptive adjustment of parameters or using information about navigation conditions to rearrange the control law, as well as with a unit for predicting the phase state of the vessel and a diagnostics subsystem, began to be produced all over the world» [1; 2].

The authors of [2], with reference to foreign sources of seaworthiness test results, indicate that «adjusting the gear ratio k_1 reduces fuel consumption by 2 %, and the use of estimates in formation of control laws reduces voyage time by 2 %» [2].

Route-following control

In general, the route of a vessel's movement consists of a sequence of straight and curved



segments. The requirement for moving through each segment is usually established by the amount of permissible lateral deviation from it. It may be necessary to adjust the selected route, for example, to diverge from other vessels or due to unfavourable conditions in the navigation area.

Automatic vessel motion control is especially widely used in open water, where active manoeuvring is not required. However, even with automatic control, there is a need to ensure that the vessel reaches the specified points on the route, especially in the presence of external disturbances such as wind and waves, and is not guaranteed by existing automatic control systems even when using the PID control law (see, for example, [1]).

With emergence of satellite navigation systems, it became possible to determine the coordinates of a vessel at any time, and, consequently, to automate the movement of a vessel along a route consisting of a set of points with known coordinates.

Technologies for using AMCSs with a satellite navigation receiver are discussed in detail in several sources [1; 2; 8].

In view of the tasks under consideration and the experience of AMCS operation, one can conclude that the control system should automatically adjust the coefficients when sailing at low speeds and depths, changing the load, as well as in strong waves.

Variants of trajectory tracking control algorithms

Trajectory tracking control has found wide application in various fields, including robotics [9; 10], aviation, including unmanned [11], this issue was also analysed in relation to maritime transport and in several other works, in addition to the above mentioned [12].

Navigation algorithms constitute an implementation of a dual task of determining one's own position in space, i. e. determination at each current moment of time of the spatial angular position (orientation algorithms) and determination at each current moment of time of projections of speed and coordinates (reckoning of speed and coordinates) on the axis of the inertial coordinate system.

Control algorithms are used to calculate such control commands to arrive at a point of interest, that is, to develop trajectories in which the relative coordinates of the vehicle and the end point of its movement would simultaneously turn to zero at some terminal (final) moment in time.

Stabilisation algorithms serve to convert control commands calculated during guidance into signals that cause steering wheel or rudder turns or changes in the position of other controls, that is, in other words, so that the rudder at each moment in time

deflects so that at the final moment in time the ship reaches the end point (e. g.: [13–15]).

Transverse acceleration guidance method

A motion trajectory is such a continuous curve, at each point of which the vehicle's speed vector is directed tangentially to it.

To change the trajectory, that is, change the direction of movement of the vehicle, it is necessary to rotate the speed vector. It is possible to rotate the speed vector in different ways.

For example, it is possible to create an increment of the speed vector in the transverse direction, that is, in other words, to create an acceleration orthogonal to the speed vector.

Instantaneous zero miss and proportional guidance methods are also used (mainly for aircraft).

A significant difficulty in implementing the heading angle PID-controller is the presence of noise in the measured heading angle signal due to sea surface roughness. In addition, in the course angle regulator it is also necessary to know the yaw rate; if its value is obtained by simply differentiating the heading angle signal, then the noisiness of the signal will increase.

If the instantaneous zero miss control method is applied to vessels, the total acceleration vector will have one zero component. Controlling a vessel by lateral acceleration is difficult to implement in practice due to the specific features of the controls, but it is possible to convert the acceleration into the corresponding angular yaw rate and control it through this parameter.

Control algorithms in the speed channel

The issues of building vessel speed control algorithms have not been considered in sufficient detail in the domestic literature. Traditionally, the control algorithm for a generalised parameter, the traction equivalent, is built based on a PID or PI speed controller. The speed channel does not appear to be difficult to be controlled.

In view of this, it is advisable to use traction equivalent control algorithms.

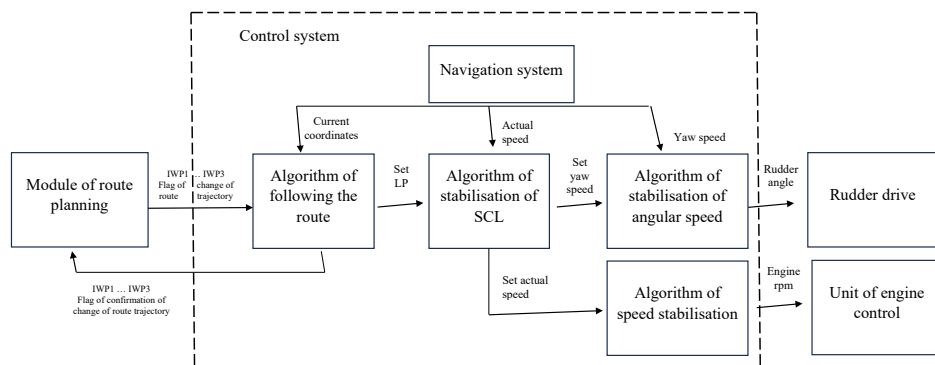
Let the current speed of the vessel V and the set speed V_g be known. Then it is possible to get a set change in speed $\dot{V}_g = R(p)(V_g - V)$, where $R(p)$ is some control operator, $\dot{V}_{gmin} \leq \dot{V}_g \leq \dot{V}_{gmax}$.

Then a traction equivalent control signal is generated:

$$E_{tg} = K_1 \dot{V}_g + \frac{K_2}{p} (\dot{V}_g - \dot{V}),$$

$$E_{tmin} \leq E_{tg} \leq E_{tmax},$$

where E_{tmin} and E_{tmax} correspond to the «low speed» and «full speed» modes. The traction equivalent is



Pic. 1. A schematic diagram of the control algorithm operation [performed by the authors].

used to obtain a linear system. Next, it needs to be converted into real traction. Coefficients K_1 and K_2 can be functions of actual speed or other parameters.

There are several possible ways to increase stability:

- introduction of a «heavy» filter into control algorithms for the control action coming to the drive;

- use of alternating on/off switching of the drive, similar to PWM control (pulse-width modulation).

Both methods will reduce system performance and their necessity must be assessed before implementation.

The given basic algorithm for controlling the speed of a vessel can be used as a first approximation when synthesising control algorithms in the speed channel.

Setting Task of Trajectory Control

The algorithm must ensure the generation of control commands to actuating units for following the route specified by three intermediate waypoints (IWP). The consequence of IWP is developed in accordance with the route and considering navigation rules and environment. Algorithm should provide for minimum vessel's deviation from the legs of route linking IWP.

The tasks are as follows:

- Control of rudders, engines and thruster.

- Control of dimensionless yaw rate

$$\bar{\omega} = \frac{\omega L}{V} = R^{-1}.$$

- Stabilisation of a set course line (SCL).

- Switching between SCL with lateral lead turn (LLT).

At each cycle of operation, the control system receives the following parameters as input:

- Vectors of coordinates of three IWP x_1 , x_2 and x_3 , forming two given course lines (x_1 , x_2) and (x_2 , x_3) (from the route planning module).

- Vector of vessel coordinates x [m] (from the measurement system); yaw rate ω_y [rad/s]; actual

speed vector V_k [m/s] (from the navigation system).

The output parameters are:

- Specified rudder position δ_s [deg] (to the rudder drive).

- Signals specifying speed of thruster n [r/s] (to the thruster control unit, in the mooring mode).

- Signals specifying engine speed n [r/s] (to the electronic engine control unit).

A schematic diagram of the route-following algorithm is shown in Pic. 1. The algorithm receives from the route planning module of the control system triplets of intermediate waypoints and the *ext_reset* flag, which signals the route-following algorithm about a new triple of IWP. In turn, the algorithm for following the route transmits the *PL_flag* of confirmation to the route planning module when moving to the second line of the route.

Directions of Further Research

The directions of further research include:

- Development of adaptive mathematical model of the dynamics of ship's motion for adjustment of control system for different vessels and different load.

- Implementation of control modes for low speed for mooring using thrusters, also for dynamic positioning and manoeuvring in the port.

- Course and speed simultaneous control to increase the accuracy of solution of control problem.

- Evaluation of speed and direction using Doppler lag relative to seabed to compensate for noise regarding speed and course.

- Evaluation of current and wind speed and direction using weather station sensors to preventively compensate for disturbance.

- Application of external quality control controllers to detect failures, optimise resources of control drives, and raise the stability of solutions.

- Common optimisation of features of control drives regarding resources and of control system regarding accuracy of following the route (number of drive activation).



CONCLUSION

An analytical review of the methods and algorithms of vessel's speed and course control was performed that also allowed highlighting key constraints on existing solutions.

Based on analytical review, the statement of the problem of trajectory tracking control of autonomous ship was formulated.

Directions of further research were identified that include development of adaptive control system that could be operated on different vessels, navigation at lower speed, simultaneous control of speed and course, application of a priori data from sensors, system stability, filtering and correcting the signals, failure recognition.

REFERENCES

1. Ostretsov, G. E., Klyachko, L. M. Methods for automating ship motion control [*Metody avtomatizatsii upravleniya dvizheniem korablya*]. Moscow, Fizmatlit publ., 2009, 120 p. ISBN 978-5-9221-1138-6.
2. Ostretsov, G. E., Klyachko, L. M. The main stages of automation of ship traffic control [*Osnovnye etapy avtomatizatsii upravleniya dvizheniem morskogo sudna*]. *Sudostroenie*, 2005, Iss. 4 (671), pp. 55–59. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=hvejud>. EDN: HVEJUD. Last accessed 17.05.2023.
3. Vagushchenko, L. L. Automatic ship motion control systems [*Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*]. Odessa, Latstar publ., 2002, 310 p. [Electronic resource]: https://www.studmed.ru/vagushchenko-ll-cymbalnn-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-dvizheniem-sudna_7e4e87fb13.html. Last accessed 17.05.2023.
4. Popov, A. N., Burylin, Ya. V., Kondratiev, A. I. Method of automatic navigation of a vessel [*Sposob avtomaticheskoi provodki sudna*]. Patent RF 2021. [Electronic resource]: <https://findpatent.ru/patent/275/2759068.html>. Last accessed 17.05.2023.
5. Zhu Qidan. The research work on the intelligent ship. The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.
6. Yan Xinping. Developments of Maritime Autonomous Surface Ships in China. The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.
7. Sawada Ryohei. Introduction to research on autonomous ships in NMRI. The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.
8. Belogortseva, M. V., Klyachko, L. M., Ostretsov, G. E. A method for automatically controlling the movement of a vessel. Patent RU 2292289 C1. Publication date 27.01.2007. Bulletin No. 7. Copyright holder: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences [*Sposob avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Patent RU 2292289 C1. Data publikatsii 27.01.2007. Byul. № 7. Pravoobladatel: Institut problem im. V. A. Trapeznikova RAN]. [Electronic resource]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002292289_20070127_C1_RU/. Last accessed 17.05.2023.
9. Vasilenko, I. V., Vedyakova, A. O. Study of trajectory control algorithms for a robot manipulator [*Issledovanie algoritmov traektornogo upravleniya robotom manipulyatorom*]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*, 2022, Vol. 18, Iss. 1, pp. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.62-71>.
10. Hoang, D. T., Pyrkyn, A. A. An algorithm of trajectory tracking control for the movement of a mobile robot without measuring the position coordinates. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, Vol. 21, Iss. 6, pp. 858–865. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-858-865.
11. Rogozin, O. V., Penskoii, I. S. Trajectory tracking control method for a multi-rotor unmanned aerial vehicle in the task of following an object [*Metod traektornogo upravleniya multirotnym bespilotnym letatelnyim apparatom v zadache sledovaniya za obektom*]. *Obrazovatelnye tekhnologii*, 2019, Iss. 4, pp. 92–110. [Electronic resource]: <https://iedtech.ru/journal/2019/4/trajectory-flight-control/>. Last accessed 17.05.2023.
12. Pshikhovop, V. Kh., Fedotov, A. A., Medvedev, M. Yu., Medvedeva, T. N., Gurenko, B. V. Position-trajectory system for direct adaptive control of marine mobile objects [*Pozitsionno-traektornaya Sistema pryamogo adaptivnogo upravleniya morskimi podvizhnymi obektami*]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2014, Iss. 3 (30), 29 p. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22843876>. EDN: TFXFED. Last accessed 17.05.2023.
13. Mavlyudov, M., Sadovnikov, Yu., Titov, V. Interceptors – a means of controlling the hydrodynamic parameters of a high-speed vessel [*Intertseptory – sredstvo upravleniya gidrodinamicheskimi parametrami bystrokhodnogo sudna*]. *Katera i yakhty*, Iss. 170, 2000, pp. 48–50. [Electronic resource]: <http://sportlib.info/Mirrors/www.katera.ru/170/page19.html>. Last accessed 17.05.2023.
14. Antonenko, S. V. Ship propulsors: study guide [*Sudovie dvizhiteli: uchebnoe posobie*]. Vladivostok, FESTU publ., 2007, 126 p. ISBN 978-5-7596-0745-8.
15. Hydraulic Steering & Accessories. [Electronic resource]: http://www.navalex.com/downloads/KOBELT_Hydraulic_Steering_&_Accessories.pdf. Last accessed 17.05.2023. ●

Information about the authors:

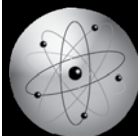
Kudrov, Maxim A., Ph.D. (Eng), Associate Professor, Director of the Institute of Aeromechanics and Flight Engineering (IALT), Director of the Advanced Engineering School of Radar, Radio Navigation and Software Engineering of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia, kudrov.ma@mipt.ru.

Bukharov, Kirill D., Ph.D. (Eng), Deputy Director for Research of the Advanced Engineering School of Radar, Radio Navigation and Software Engineering of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia, bukharov.kd@mipt.ru.

Makhotkin, Daniil R., engineer, Project Manager at the Advanced Engineering School of Radar, Radio Navigation and Software Engineering of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia, makhotkin.dr@mipt.ru.

Aivazov, Rafael S., engineer at the Advanced Engineering School of Radar, Radio Navigation and Software Engineering of Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia, aivazov.rs@mipt.ru.

Article received 08.05.2023, approved 11.07.2023, accepted 14.07.2023.



Assessment of the Technical Condition of Spur Dikes



Roman M. Tlyavlin

Scientific Research Centre «Sea Coasts», subdivision of the Central Research Institute of Transport Construction, Sochi, Russia.

✉ TlyavlinRM@Tsnis.com.

Roman M. TLYAVLIN

ABSTRACT

Spur dikes are one of the types of structures for engineering protection of the roadbed, which, in combination with a wave-damping beach, are used to protect the railway track from wave action.

The objective of this work is to improve safety of coast railway track operation in areas subject to wave action. The author used the methods of experimental research and survey for obtaining the criteria for assessing the technical condition of spur dikes.

Based on the results of the survey of spur dikes, conclusions were drawn about low quality of construction, and the main types of defects were identified both in entire structures and in their

elements. Experimental studies on hydrowave models were carried out to assess the beach-holding capacity of the spur dikes and their resistance to wave action in the wave basin. It was proposed to divide the spur dikes into separate elements according to the degree of their significance, and the criteria for the technical condition by types of defects for each element of the structure under consideration were obtained.

The technical condition criteria obtained from the results of surveys and experimental studies make it possible to assess the technical condition of spur dikes, which will increase railway operation safety.

Keywords: shore protection structures, wave basin, railway track, roadbed, engineering protection, survey, spur dike, technical condition criteria, experimental studies.

For citation: Tlyavlin, R. M. Assessment of the Technical Condition of Spur Dikes. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 189–196. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-3>.

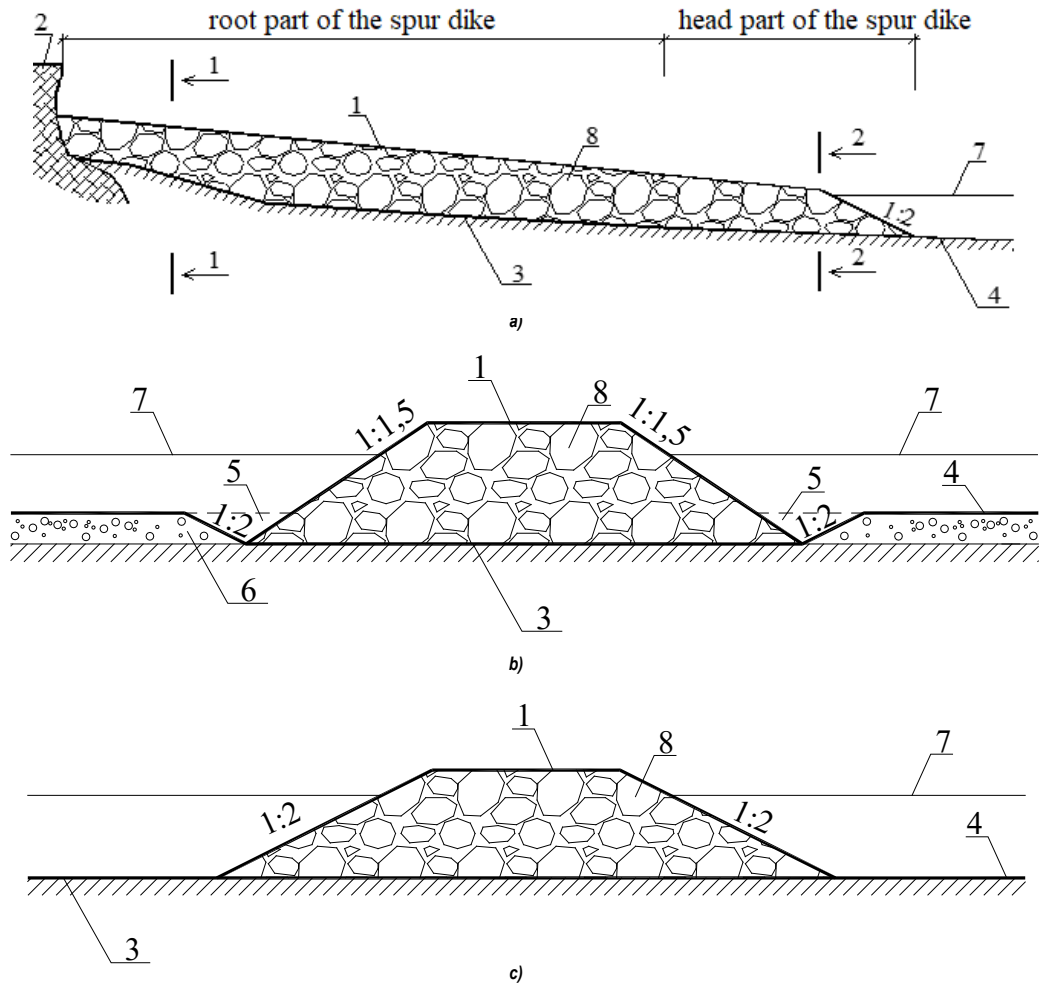
The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

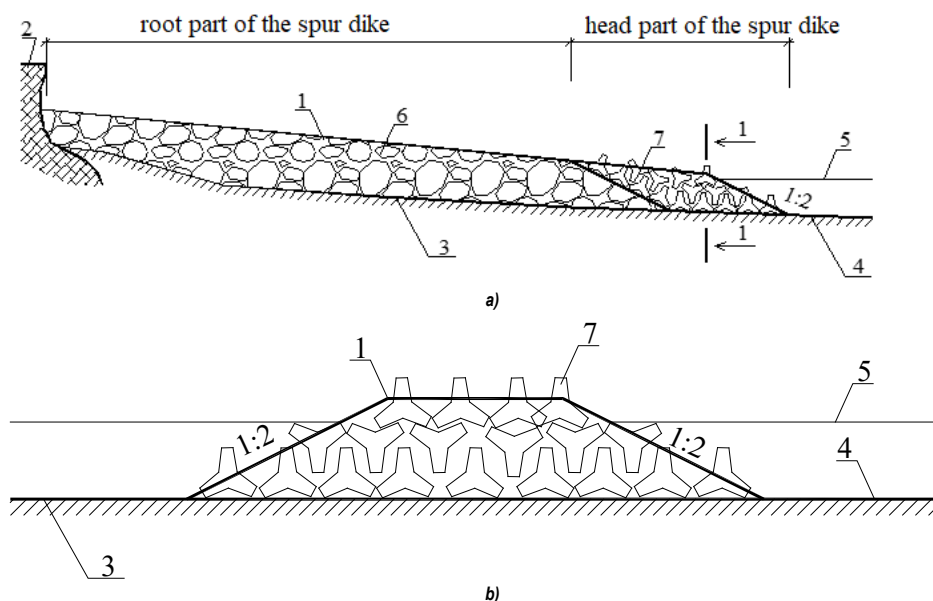
Abrasion processes on seacoasts lead to significant material consequences and reduce safety of railway roadbed operation. Railways in the Russian Federation have been built and operated under the conditions of wave abrasion on the coastal sections along the shores of the Black Sea, Lake Baikal, and Sakhalin Island. To protect the coastal sections of railways from wave action, engineering protection structures (shore protection structures) are used, which also include gravel-and-stone (or stone, or rock-fill) dike spurs. Rock-fill spur dikes are classified as active coastal protection structures designed to retain beach material. An artificial beach is an «ideal» wave-damping structure, but in some parts of the coast it cannot exist without beach-retaining structures (spur dikes), as it is intensively eroded, being drawn into the alongshore sediment flow.

In accordance with SP [Construction rules] 277.1325800.2016¹, dikes are subdivided by permeability, by design, by the materials from which they are built, and by the method of sediment passage. By design, stone spur dikes can be built of dimension stone (Pic. 1) or with a core consisting of smaller stones. In this case, the core must be protected from erosion by a larger homogeneous dimension stones with a protective layer thickness of at least three stone diameters. The angles of the slopes of the side faces of stone spur dikes should not be steeper than 1:1,5, and the head section should not be steeper than 1:2. The root part of the spur dike, as a rule, adjoins the sea wall.

¹ SP 277.1325800.2016 Coastal protection structures. Design rules. App. by the Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, No. 963/pr, dated December 16, 2016. Moscow, Tekhnorma publ., 2017, 58 p. [Electronic resource]: https://standartgost.ru/g/%D0%A1%D0%9F_277.1325800.2016. Last accessed 24.05.2023.



Pic. 1. Stone spur dike on rocky soils: a – longitudinal section; b – cross section 1–1; c – cross section 2–2; 1 – spur dike profile; 2 – wave wall; 3 – rocky bed; 4 – existing bed; 5 – backfill; 6 – beach material; 7 – water level; 8 – dimension stone [performed by the author].



Pic. 2. Combined spur dike: a – longitudinal section; b – cross section 1-1; 1 – spur dike profile; 2 – wave wall; 3 – rocky bed; 4 – existing bed; 5 – water level; 6 – dimension stone; shaped arrays (tetrapods) [performed by the author].

The author, based on the results of experimental studies in the wave basin at the testing facilities of the branch of Sea Coasts Scientific Research Centre of the JSC Central Research Institute of Transport Construction and of the field survey on the section of Tuapse – Adler railway [1], repeatedly recorded the destruction of the head parts of rock-fill spur dikes.

In [2], it is noted that one of the main reasons for destruction of rock-fill spur dikes is their construction quality, this is also confirmed in [3, 4].

To strengthen the head parts of spur dikes, they can be filled with tetrapods, as a rule, weighing 5,0 tons. Such spur dikes can be called combined spur dikes. A typical solution for construction of combined spur dikes is shown in Pic. 2.

A combined design of a spur dike is known, when shaped concrete blocks, for example, tetrapods, strengthen not only the head part of the spur dike, but also the side surfaces along the contour of the structure [5]. In this paper, for additional stability, it is proposed to connect concrete blocks with ropes if necessary.

The works [6, 7] describe the methods of scientific substantiation of regulatory requirements and substantiate the need to develop a regulatory document on the use of natural stone

in hydraulic engineering. They also offer the description of the world experience in construction of hydraulic structures made of stone and confirm the expediency of its application.

The objective of the research described in the paper was to improve safety of railway track operation at coastal sections subject to wave action. The article considers issues of developing criteria for assessing the technical condition of structures. The main methods that allowed drawing the conclusions when obtaining criteria for assessment of the technical condition of spur dikes, should include: experimental studies in wave basins carried out at the testing facilities Sea Coasts Scientific Research Centre, as well as survey and field observations on Tuapse – Adler railway section. The method of physical modelling of interaction of waves with hydraulic structures is the most reliable in terms of obtaining not only qualitative, but also quantitative results [8–12].

When developing GOST [State Standard] R 59241-2020, the author proposed and published a methodology for assessing the technical condition of engineering protection structures under wave action conditions [13–15], that considered in detail concrete spur dikes and wave-damping structures, such as protective wave-damping screens made of concrete blocks





Pic. 3. View of deformed stone spur dikes [photo by the author, 07.02.2008].

or natural stone, wave damping beach and fill berms. Though, the issues of assessing the technical condition of spur dikes were not considered in [13–15].

RESULTS

The first stone spur dikes were built in 2005 at the 1933rd km of the section of Tuapse – Adler railway between Chemitokvadzhe and Yakornaya Shchel stations in Osokha River area according to the project carried out by CJSC Kavgioprotrans. To create a wave-damping pebble beach, capable of neutralise the energy of storm waves, the project provided for the dumping of pebble material with an average size of 40–70 mm in front of the wave-break wall. As beach-retaining structures, spur dikes were used made of dimension stone. The length of the spur dikes was of 45 m along the ridge. The freeboard at the root parts of spur dikes should have been +2,6 m relative to the Baltic height system, and +0,8 m for head parts. The side faces of the spur dikes were built as slopes with gradient 1:1,5 in the root part smoothly passing to the gradient of 1:2 in the head part. The head parts of the rock-fill spur dikes attained with their slopes the depths exceeding 3,5 m, where waves over 3 m high fell on them. To ensure stability of stone spur dikes to wave action, dimension stones weighing from 3 to 5 tons each were to be used in construction.

During the first three years after the construction, the stone spur dikes had been significantly deformed by storms (Pic. 3).

Based on the results of examination of the deformed structures, it was concluded that the cause of destruction was poor-quality construction. The main deviations should include discrepancy between the geometry of the constructed stone spur dikes and the project, the gradients of the slopes were not respected, the marks in the root and head parts of the spur dikes were lower than designed, the width of the spur dikes along the ridge was less than six meters, the size of the stone was much lower than that provided for in the project.

In total, 153 stone spur dikes were built on the section of Tuapse – Adler railway during the period from 2005 to 2017, and by the end of 2017, 62,7 % needed repair [1, 16, 17].

Pic. 4 shows the process of measuring the size of the stone used in construction of stone spur dikes. According to the results of measurements, it was found that the average size of a stone in the body of a spur dike is from 0,5 to 1 m, and the weight, respectively, from 150 to 1300 kg, while the project provided for that spur dikes will be built of stones with a size of about 1,5 m and a weight of 3 to 5 tons.

It should also be noted that the quality of the stone itself does not correspond to the project specifications, a stone of low strength and with an aspect ratio of more than three is often used. In accordance with GOST [State Standard] R 70021-2022, in construction of shore protection structures, it is necessary to use rock that is homogeneous in composition and not subject to



Pic. 4. Assessment of stone size in stone spur dikes [photo by the author, 20.07.2007].

flakiness. The ratio of the maximum size of each stone to the minimum one should not exceed 3. This requirement is due to the need for stability of the stone on the slope under wave action. There are cases when a structure built of slab-shaped stones was destroyed, although the size of the stones corresponded to the calculations.

To test the effect of stone flakiness on resistance of spur dikes to wave action, a series of experiments was carried out in the middle wave basin at the testing facilities of Sea Coasts Scientific Research Centre.

Experimental studies were carried out in accordance with the well-known methodology described in [8, 18–20], which is based on the theory of similarity. When reducing the modelling object, geometric similarity, similarity of the wave regime, of surface and volumetric forces must be ensured. Meanwhile when the same liquid (water) is present in the model and in reality, it is impossible to simultaneously ensure similarity according to Reynolds and Froude numbers. However, solving many problems does not require simultaneous similarity according to both parameters [21].

Experimental studies were carried out on a scale of 1:30. The location of the head parts of the spur dikes, subject to the greatest wave action, coincided with the line of the last wave breaking. The wave height was 3,6 m and the average period was 10,2 s. The interaction of the initial wave with the stone spur dike is shown in Pic. 5.

As a result of the experiment, it was found that a slab-shaped stone, placed in the head part

of a spur dike, is less resistant to wave action compared to a stone shaped rather like a ball, and a structure built from such stones is destroyed. Pic. 6 shows the model without water at the end of the experiment. The head part of the stone spur dike with the length of 22 m was destroyed. This resulted in deterioration of the beach-holding capacity of the spur dike, and the width of the beach decreased from the designed 35 m to 15 m. Thus, the main function of the spur dike to hold the beach material was not fulfilled.

Considering the experience of monitoring the constructed spur dikes and the experimental studies on stability of rock-fill structures to wave action, it was concluded that the main group of elements is a rock-fill or bulk concrete structure since the loss of stability of individual elements of that structure affects the beach-holding capacity of the entire spur dike.

It is proposed to divide the spur dikes into separate elements according to the degree of their significance. Spur dikes comprise two main groups of elements with the corresponding significance rate b_i : the rock-fill or bulk concrete structure with $b_i = 80 \%$ and the bed in front of the structure with $b_i = 20 \%$. Depression, including local one, can lead to an increase in the wave action on the structure and to the loss of stability of individual elements of the structure.

To assess the technical condition of rock-fill structures according to the method described in [13–15], it is necessary not only to divide the rock-fill spur dikes into separate elements





Pic. 5. Interaction of waves with the stone spur dike [photo by the author].



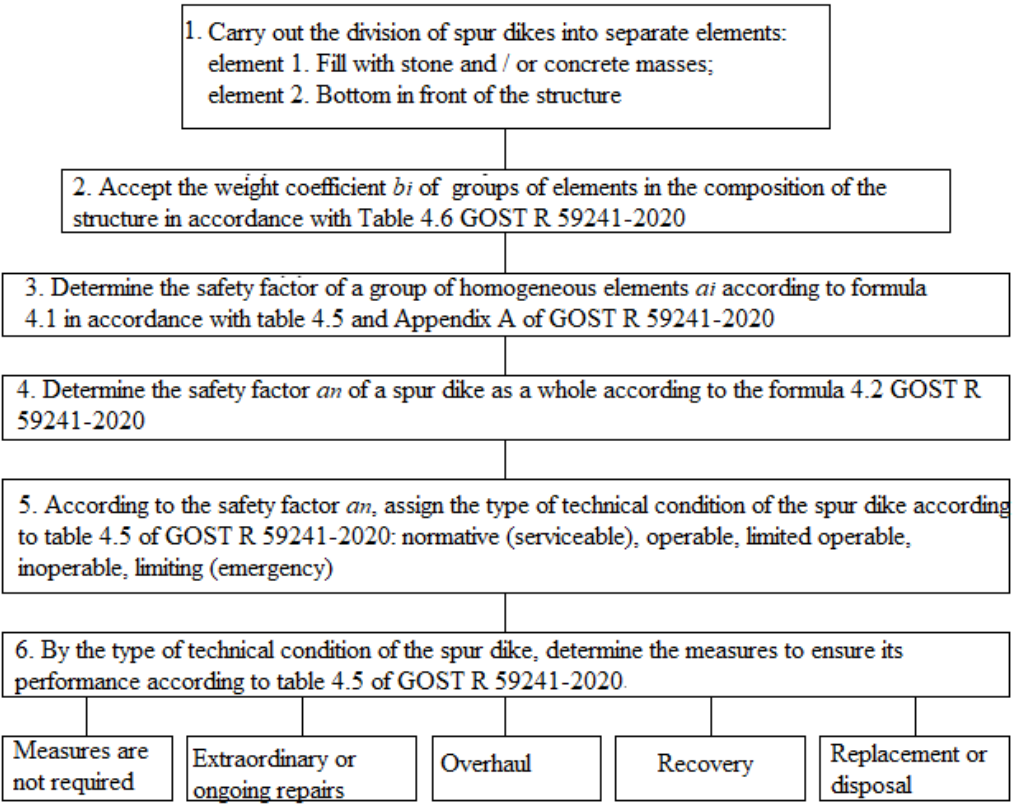
Pic. 6. View of the rock-fill spur dike at the end of the experiment [photo by the author].

according to their significance rate, but also to obtain criteria of technical condition by types of defects for each element of the structure under consideration. In accordance with [15], the technical condition of the structure is divided into five groups from the condition compliant with standards (operable) to the limiting (emergency) condition. The safety factor of the structure, determined by formula 4.2² for the standard (serviceable) state is $a_n = 1$, and for the limiting (emergency) – $a_n = 0$.

To determine the safety factor of a group of homogeneous elements a_i according to formula 4.1², when performing a comprehensive survey by means of an expert assessment, it is necessary to assign a special value of the safety factor of an individual element a_j . In case of fixing a local

depression of the bed in front of construction by not more than 0,2 m in depth and within a section with a length of not more than 0,25 of the diameter of the stone or the height of the concrete unit, the operable state of the element with $a_j = 1, 0-0,8$ is assigned. The limit (emergency) state with $a_j = 0,2-0$ is assigned when fixing a local depression of more than 0,5 m in depth and on a bed section with a length of more than 0,25 of the stone diameter or the height of the concrete unit.

The safety factor of individual elements of a rock-fill or bulk concrete structures must be assigned according to the types of defects: erosion and landslides of slopes, mass deviation and deviation of the strength of stones or concrete units to a smaller side. It is necessary to refer to



Pic. 7. Block diagram for determining the technical condition and the required measures to ensure operability of the spur dikes [performed by the author].

the operable state with $a_j = 1,0-0,8$ the elements of the structure, in which there are no erosion and landslides of the slopes of the structure, the mass of the elements of the structure differs from the design one by no more than 5 % and the deviation of the strength of the element differs to the smaller side from the design value by no more than 7 %. The limiting (emergency) state with $a_j = 0,2-0$, respectively, includes elements of the structure with a deviation in the mass of elements by more than 10 %, and with a deviation in strength by more than 20 % down from the design values. The safety factor in case of erosion and landslides of the slope is determined by an expert, depending on their respective magnitude.

CONCLUSIONS

Based on the proposed criteria, a block diagram was constructed to determine the technical condition and the required measures to ensure operability of the rock-fill or bulk concrete spur dikes (Pic. 7).

The criteria proposed by the author for assessing the technical condition of the spur dikes

are included in the GOST R 59241–2020² developed by Sea Coasts Scientific Research Centre, allowing further improvements in the safety of railway operation in areas subject to wave action.

REFERENCES

1. Tlyavlina, G. V. Research, survey work and engineering surveys in the general scope of work on a comprehensive survey of the coastal side of Tuapse – Adler railway section of the North Caucasian Railway. Stage 2. Carrying out a continuous survey from the seaside of the coastal protection and reinforcing structures of the railway track, with a simultaneous survey of the wave damping strip. Research report [Nauchno-issledovatel'skie, obsledovatel'skie raboty i inzhenernye izyskaniya v obshchem sostave rabot po kompleksnomu obsledovaniyu beregovoi storony zheleznodorozhnoi linii Tuapse – Adler Severo-Kavkazskoi zheleznoi dorogi. Etap 2. Provedenie sploshnogo obsledovaniya so storony moray beregozashchitnykh i ukreplitelnykh sooruzhenii zheleznodorozhnogo puti, s odnovremennym obsledovaniem volnogasyashchei polosy. Otchet o NIR]. Sochi, Sea Coasts Scientific Research Centre, 2018, 327 p.

2. Makarov, K. N., Migorenko, A. V. Coast of Sochi in danger because of technogenic catastrophe. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*, 2012, Iss. 2 (157), pp. 34–36. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20328874>. Last accessed 15.02.2023.



3. Tlyavlin, R. M., Tlyavlina, G. V. Assessment of coastal protection structures of the Tuapse-Adler railway track. *Transportnoe stroitelstvo*, 2017, Iss. 2, pp. 23–25. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30025626>. Last accessed 16.02.2023.
4. Tlyavlina, G. V., Tlyavlin, R. M. Problems of design and construction of coastal protection structures at Tuapse-Adler section [*Problemy proektirovaniya i stroitelstva beregozashchitnykh sooruzhenii na uchastke Tuapse-Adler*]. Seashores – evolution, ecology, economics: Proceedings of XXIV International Coastal Conference dedicated to the 60th anniversary of the founding of the Working Group «Seashores»: in 2 volumes, Tuapse, October 1–6, 2012. Working group «Seashores», Russian State Hydrometeorological University. Volume 2. Tuapse, LLC «Izdatelskiy Dom – Yug», 2012, pp. 217–220. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22684119>. Last accessed 16.02.2023.
5. Yavna, V. A., Okost, M. V., Khakiev, Z. B. [et al]. Utility model patent № 151362 U1 Russian Federation, IPC E02B 3/04, E02B 3/12. Combined design of a shore protection structure: № 2014127601/13: appl. 07.07.2014: publ. 10.04.2015. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38369767>. Last accessed 17.02.2023.
6. Tlyavlina, G. V. Methods of scientific substantiation of regulatory requirements in the field of engineering protection of transport structures from wave action [*Metody nauchnogo obosnovaniya normativnykh trebovaniy v oblasti inzhenernoi zashchity transportnykh sooruzhenii ot volnovogo vozdeistviya*]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2023, Iss. 2(64), pp. 80–91. DOI 10.52409/20731523_2023_2_80.
7. Tlyavlina, G. V., Vyalyi, E. A. The Use of Natural Stone in Marine Hydraulic Engineering Construction. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2022, Iss. 2, pp. 53–69. DOI 10.22449/2413–5577–2022–2–53–69.
8. Frostick, L. E., McLelland, S. J., Mercer, T. G. Users guide to physical modelling and experimentation. London: Taylor & Francis Group, 2011, 272 p. DOI: 10.1201/b11335. ISBN 9780415609128.
9. Santamaria, M., Diaz-Carrasco, P., Moragues, M. V., Clavero, M., Losada, M. Uncertainties of the actual engineering formulas for coastal protection slopes. The dimensional analysis and experimental method. *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*, 2022. DOI: 10.3850/IAHR-39WC252171192022900.
10. Clavero, M., Chiapponi, L., Longo, S., Losada, M. A. Laboratory Tests on Wind-Wave Generation, Interaction and Breaking Processes. In: Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M.G., Faria, P. (eds) *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_11 [limited access].
11. Ranasinghe D. P. L., Kumara I. G. I. K., Engiliyage N. L., Raveenthiran K. Effectiveness of Dummy Water Levels in Physical Models to Optimize the Toe and the Crest Levels. Proc. 8th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science Dec. 9th–12th, 2020, Zhoushan, China, pp. 42–51. [Electronic resource]: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=8784>. Last accessed 24.05.2023. ISBN: 978-90-824846-5-6.
12. Vyaly E., Makarov K., Tlyavlina G. Permeable Constructions of Artificial Islands. *Power Technology and Engineering*, 2022, Vol. 56, Iss. 1, pp. 52–58. DOI: 10.1007/s10749-023-01470-7.
13. Tlyavlin, R. M. Criteria for the technical condition of concrete spur dikes. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2023, Iss. 1(57), pp. 73–82. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-1-73-82.
14. Tlyavlin, R. M. Problems of inspection and monitoring of structures of engineering protection of the coastal zone [*Problemy obsledovaniya i monitoring sooruzhenii inzhenernoi zashchity beregovoi zony*]. *Olympic Legacy and Large-Scale Events: Impact on the Economy, Ecology and Socio-Cultural Sphere of Host Destinations: Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference (Sochi, November 14–15, 2019)*. Sochi, RIC FGBOU VO SSU, 2019, pp. 244–248. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41552411> [metadata]. EDN: TSXMYU. https://elibrary.ru/download/elibrary_41552215_50967690.pdf [complete text of conference's proceedings]. Last accessed 22.05.2023.
15. Tlyavlin, R. M. Assessment of the technical condition of wave canceling structures for engineering protection of roadbeds from wave exposure. *Proceedings of Petersburg Transport Univers ity*. St.Petersburg, PGUPS publ., 2020, Vol. 17, Iss. 2, pp. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209.
16. Ashpiz, E. S. Comprehensive survey of the coastal side of Tuapse–Adler railway line of the North Caucasian Railway. Stage 2. Carrying out a continuous survey from the seaside of the coastal protection of the railway track, with a simultaneous survey of the wave damping strip. Book 1. The results of the survey on Tuapse–Shepsi–Vodopadny–Lazarevskaya section. 1885 km PK6+00–1914 km PK0+00. Technical report. Moscow, Non-profit partnership to support scientific and scientific and technical activities at Moscow State University of Railway Engineering NP «Science-MGUPS», 2018, 335 p.
17. Ashpiz, E. S. Comprehensive survey of the coastal side of Tuapse–Adler railway line of the North Caucasian Railway. Stage 2. Carrying out a continuous survey from the sea side of the coastal protection of the railway track, with a simultaneous survey of the wave damping strip. Book 2. The results of the survey on Lazarevskaya–Chemitokvadzhe–Yakornaya Shchel – Loo section. 1916 km PKZ+00–1947 km PK0+00.: Technical report. Moscow, Non-profit partnership to support scientific and scientific and technical activities at Moscow State University of Railway Engineering NP «Science-MGUPS», 2018, 275 p.
18. Sharp, J. J. Hydraulic modelling [In Russian. Transl. by Yaskin, L. A.] Moscow, Mir publ., 1984, 280 p.
19. Levi, I. I. Modelling of hydraulic phenomena [*Modelirovanie gidravlicheskh yavlenii*]. Leningrad, Energia publ., 1967, 236 p.
20. Tlyavlina, G. V. Laboratory and field studies to ensure the regulatory framework development and the transport facilities' safety in the wave effect conditions [*Laboratornie i naturnye issledovaniya v obespechenie razvitiya normativnoi bazy i bezopasnosti transportnykh sooruzhenii v usloviyakh volnovogo vozdeistviya*]. *Russian Journal of Transport Engineering*, 2022, Vol. 9, Iss. 4. – DOI 10.15862/10SATS422.
21. Daily, J. W., Harleman, D. R. F. Fluid Dynamics. [In Russian. Transl. from English]. Moscow, Energia publ., 1971, 480 p. ●

Information about the author:

Tlyavlin, Roman M., Ph.D. (Eng), Head of the Sea Coasts Scientific Research Centre, a subdivision of the Central Research Institute of Transport Construction, Sochi, Russia, TlyavlinRM@Tsnis.com.

Article received 03.03.2023, approved after reviewing 25.06.2023, accepted 28.06.2023.



The Impact of Anisotropic Properties of the Rail Track Superstructure on the Parameters of Dynamic Settlement of Bridge Approaches



Zulfiya T. Fazilova

Russian University of Transport, Moscow, Russia.

✉ fazil_1905@mail.ru

Russian science electronic library SPIN-код: 9817–6928, Russian Science Index

AuthorID: 459237, ORCID: 0000-0001-5933-1208

Zulfiya T. FAZILOVA

ABSTRACT

Numerous artificial structures, bridges, overpasses, tubes, channels, chutes are operated on railway networks. Artificial structures are considered to have a longer life cycle and thus will need during it overhaul and reconstruction with the use of modern technology. Currently, there is an increase in axial load and traffic speed, the makes even more relevant the solution of tasks referring to dynamic impact of trains on artificial structures and superstructure. See the features of construction and maintenance of rail track sections at the approaches to bridges, the respective problems merit special consideration.

The research which results are presented in the article was dedicated to the impact of the anisotropy of the track superstructure on the parameters of the dynamic settlement of sections of

transitional stiffness located at the approaches to bridges and built using bottomless box culverts.

The research proposed to model the railway track within the transitional section as a set of flat elements of constant thickness, while each of them is regarded as a anisotropic plate supported by deformable foundation with its own deformability rates. By setting boundary conditions for individual fragments of the track structure and varying the anisotropy coefficients that determine the ratio of mechanical characteristics in different directions of anisotropy, it is possible to select necessary rail track stiffness rates for a section at bridge approaches, that paves the way to further research on structural features of designing and arrangement of those structures.

Keywords: railways, artificial structures, transition section, modulus of elasticity, bottomless box culverts, natural frequency, anisotropic plate, decomposition method, bending and shear stiffness, dynamic deflection.

Funding: the work was carried out with financial support of the grant of the JSC Russian Railways within the contract No. 5106449 of 28.12.2022 intended for development of academic and scientific schools of railway transport.

Acknowledgements: the author expresses the sincere gratitude to the colleagues in the research: Alexey A. Loktev, Professor, D.Sc. (Physics and Mathematics), and Elvira N. Egereva, Ph.D. (Physics and Mathematics).

For citation: Fazilova, Z. T. The Impact of Anisotropic Properties of the Rail Track Superstructure on the Parameters of Dynamic Settlement of Bridge Approaches. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-4>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Statement of the Problem

About 83 thousand artificial structures are operated on the railway network of the Russian Federation, of which bridges and overpasses account for 37 %, pipes and chutes account for 59 %. Many of the artificial structures are in urgent need of major repairs or reconstruction using modern materials and technologies. In addition, an increase in axial loads and traffic speed requires more detailed analysis and refinement of existing approaches to solving problems associated with the dynamic impact of trains on artificial structures objects and the roadbed. The problem indicated is relevant for the railways of most countries because of long duration of operation of artificial structures and modern trends in railway development.

The sites of junction of the railway track with the artificial structures is one of the main areas of sharp changes in vertical stiffness of the track, which engender an increased failure rate of track superstructure elements, time and resources needed for maintenance of a section, and requires special technology of construction and maintenance [1–8].

When constructing sections of variable stiffness, various designs are used, recommended, in the framework of international organisations, e. g., OSJD, to create a gradual levelling of the stiffness of the under-rail base on the approach to the artificial structures [9].

Nevertheless, the increase in axial loads and the increasing operation of heavy and high-speed traffic poses the task of a more detailed study of the dynamic impact of the rolling stock on the design of the transition stiffness sections to further optimise it.

In general, from the point of view of existing approaches of scientific methodology and engineering calculations, problems of dynamic impact on the sections of variable stiffness are considered by modelling with the use of differential calculations regarding two segments connected by a transition section.

In works [10–17], based on the results of an analysis of field experiments, railway transition zones were modelled to predict their short-term and long-term behaviour under increased train load. The results showed that the deflection of the rail in the transition section from the embankment to the bridge has a significant impact on the magnitude of the dynamic impact of the wheel on the rail, as well as on its vertical

acceleration, the value of which at the moment the wheel passes through the control section should not exceed $0,1g$, where g is the free-fall acceleration. The dynamic analysis carried out on the deformation properties of the bridge crossing and the nature of the interaction between the train and the track made it possible to identify the main factors influencing the dynamics of the process: the speed of trains moving along the section, deformation from rail deflection, changes in the stiffness characteristics of the under-rail base, etc. In this case, the attenuation of vertical stresses is 40 %–60 % at a depth of 0,6 m, 80 %–90 % at a depth of 2,5 m [18–21].

The Objective of the Research

The objective of the study was to solve an axially symmetric problem of modelling the design of a section of variable stiffness built of bottomless box culverts and corresponding to a straight track section. The hypothesis of the research was that it was possible to select the required parameters of the stiffness of a section of variable stiffness in three directions of anisotropy with preset maximum value vertical displacement since it will further allow to formulate features of construction and maintenance of above structures.

RESULTS

Research Methodology

For sections subject to increased axial load, it is proposed to use bottomless box culverts filled with ballast materials (Pic. 1). The height of the boxes varies along the length of the transition section from the maximum (near the bridge abutment) to the minimum at the junction with the conventional track within 2,5–0,8 m. In this case, the deformation modulus will decrease from the junction of the artificial structures with rail approaches along the length of the track up to 25 m from 130 MPa to 80 MPa (Pic. 2).

It is proposed to consider the change in the natural vibration frequency of the structure of the transition stiffness section for its model flat element, considering the interaction with other elements of the track structure, anisotropic properties, and various boundary conditions [22–25]. In this case, the superstructure of the railway track and the roadbed underneath it for the entire height of the embankment are represented as a set of layers of constant thickness, tightly adjacent to each other.

In domestic and foreign literature, two approaches to mathematical modelling of such structures can be distinguished. The first approach consists of aggregating flat layer-by-layer models with various properties into a single multilayer structure. The second approach is based on the study of a single-layer structure, for which anisotropic properties in different directions of anisotropy are considered. In fact, changing the mechanical characteristics of the material allows one to model inhomogeneous media using the given values [26–28]. In both the first and second cases, it is necessary to supplement the governing equations with boundary conditions on the faces and contacting surfaces, and, using the initial conditions, to specify the features of the application of dynamic load from the rolling stock.

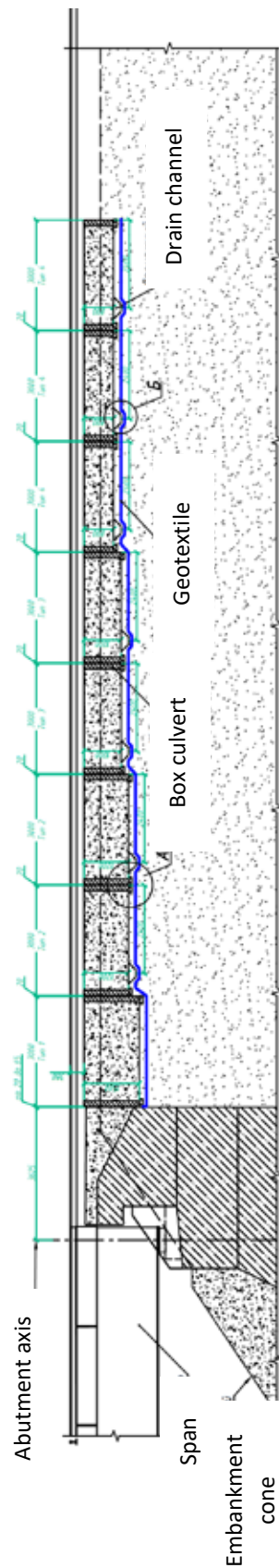
This study is based on the second approach. The railway track is proposed to be modelled with flat elements, each of which is represented by an anisotropic plate resting on a deformable base with its own deformability parameters. Various boundary conditions can be used along the contour, varying which it is possible to achieve good compliance with the real structure of the railway track and its mathematical model. Such generally non-trivial approaches are mainly suitable for the railway track sections of variable stiffness in front of and behind artificial structures at linear transport infrastructure facilities.

As a mathematical model describing the dynamic behaviour of a transversely isotropic plate lying on a deformable base and experiencing the influence of an external normal load, simulating the effect of rolling stock, it is proposed to use the equation of transverse vibrations for a transversally isotropic plate of constant thickness, rigidly supported on all four sides, since this representation is the most approximate when using reinforced concrete box structures that limit movement of the material inside the shell in all directions. We assume that before the load is applied, the flat element is located in the area of the following coordinates $\{0 \leq x \leq l_1; 0 \leq y \leq l_2; -h \leq z \leq h\}$, and the vibration equation can be represented as:

$$A_1 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} - A_3 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta W + A_4 \Delta^2 W + P(W) = 0, \quad (1)$$

where W is transverse displacement of points on the middle plane of the plate; Δ – Laplace operator.

In this case, the anisotropy coefficients have the form:



Pic. 1. Design of a section made of bottomless box culverts [the scheme was compiled with participation of the author].

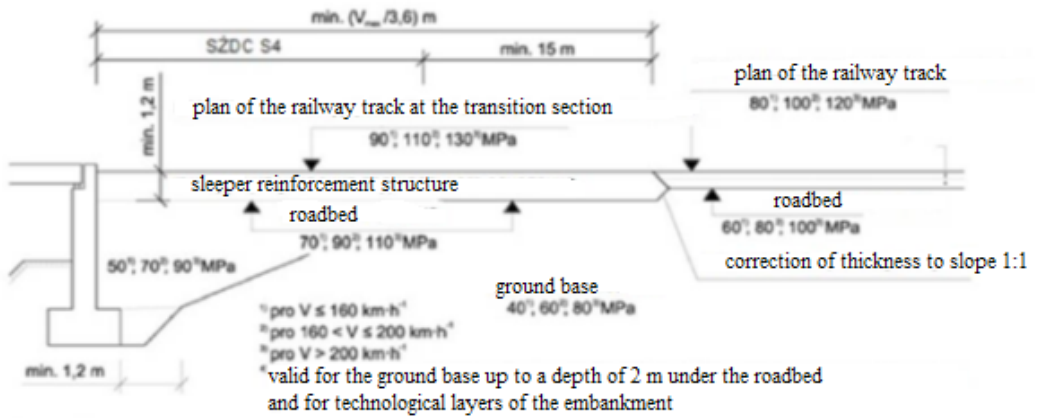


Рис. 2. Требование к конструкции переходного участка для моста с безбалластным полотном [9, рис. 23].

$$A_1 = \rho_1;$$

$$A_2 = \rho_1^2 (A_{33}^{-1} + 3A_{44}^{-1}) \frac{h^2}{b};$$

$$A_3 = \left\{ -\rho_1 \left[2 - 2A_{11}A_{33}^{-1} - 3(A_{13}^2 - A_{11}A_{33})A_{33}^{-1}A_{44}^{-1} \right] \right\} \frac{h^2}{b};$$

$$A_4 = 2A_{33}^{-1} (A_{11}A_{33} - A_{13}^2) \frac{h^2}{b};$$

$$A_5 = \frac{S}{2h} \rho_1;$$

$$A_6 = \frac{S}{2h} \rho_1 \frac{h^2}{2} (\rho_1 A_{44}^{-1} + 3A_{33}^{-1});$$

$$A_7 = -4 \frac{S}{2h} \rho_1 A_{11} A_{33}^{-1};$$

where the following notations are introduced:

$$P(W) = A_5 \frac{\partial W}{\partial t} + A_6 \frac{\partial^3 W}{\partial t^3} + A_7 \Delta \frac{\partial W}{\partial t} - \text{resistance};$$

ρ_1 – density;

b – transverse wave speed;

$A_{11} = A_{13} = \dots = A_{nm}$ – anisotropy coefficients that determine the ratio of mechanical characteristics in different directions of anisotropy.

In this study, three main directions of change in the mechanical and geometric characteristics of the structure are identified: horizontal – along the rails, transverse – along the sleepers, and a vertical direction – down from the level of the rail head.

The boundary conditions for individual fragments of the track structure in this case take the form:

$$\begin{aligned} W = \frac{\partial W}{\partial x} = 0; x = 0, l_1 \\ W = \frac{\partial W}{\partial y} = 0; y = 0, l_2. \end{aligned} \quad (2)$$

The solution to equation (1) is constructed in the following form:

$$W(x, y, t) = W(x, y) \exp\left(\xi \frac{bt}{h}\right), \quad (3)$$

where ξ – natural frequency of the plate.

Then the equation (1) can be represented in the form:

$$W(x, y)(\Delta^2 + B_1 \Delta + B_2) = 0. \quad (4)$$

Here

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{A_4} \left(-A_3 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_7 \left(\frac{b\xi}{h} \right) \right); \\ B_2 &= \frac{1}{A_4} \left(A_1 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^2 + A_2 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^4 + A_5 \left(\frac{b\xi}{h} \right) + A_6 \left(\frac{b\xi}{h} \right)^3 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

For the convenience of representing variables and finding geometric relationships, we use dimensionless coordinates and deflection functions:

$$x = \frac{l_1}{\pi} \alpha; y = \frac{l_2}{\pi} \beta; W(x, y) = V(\alpha, \beta) \frac{l_1^4}{\pi^4}. \quad (6)$$

Considering the dimensionless coordinates and the relation $\eta = l_1 / l_2$, the governing equation can be represented in the following form:

$$V(\alpha, \beta) \left(\left(\frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + 2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \eta^4 \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \right) + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right) = 0. \quad (7)$$

To solve equation (7), we will use the decomposition method, which involves dividing the general problem into three auxiliary ones, after solving each of which the result is proposed to be aggregated:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 V_1}{\partial \alpha^4} &= f_1(\alpha, \beta) \quad V_1 = \frac{\partial V_1}{\partial \alpha} = 0 \quad \alpha = 0, \pi; \\ \eta^4 \frac{\partial^4 V_2}{\partial \beta^4} &= f_2(\alpha, \beta) \quad V_2 = \frac{\partial V_2}{\partial \beta} = 0 \quad \beta = 0, \pi; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left[2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right] V_3 + f_1 + f_2 = 0.$$

According to the decomposition method, we will approximately assume that

$$V_1 \equiv V_2; V_3 = \frac{1}{2}(V_1 + V_2), \quad (9)$$

and at given points of the plate we will look for arbitrary functions in the form:

$$f_i(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} a_{n,m}^{(i)} \sin(n\alpha) \sin(m\beta), \quad (10)$$

where $a_{n,m}^{(i)}$ are arbitrary constants, where $i = 1, 2$.

We will look for a general solution to auxiliary problems in the form:

$$V_1(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(1)}}{n^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \frac{\alpha^3}{6} \psi_1(\beta) + \frac{\alpha^2}{2} \psi_2(\beta) + \alpha \psi_3(\beta) + \psi_4(\beta); \quad (11)$$

$$V_2(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(2)}}{\eta^4 m^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \frac{\beta^3}{6} \phi_1(\alpha) + \frac{\beta^2}{2} \phi_2(\alpha) + \beta \phi_3(\alpha) + \phi_4(\alpha);$$

where $\psi_i(\beta)$ and $\phi_i(\alpha)$ are arbitrary functions.

Satisfying the general solution to the boundary conditions and considering auxiliary problems, we can determine all arbitrary functions $\Psi_1(\beta)$ and $\phi_i(\alpha)$ through the system:

$$\begin{cases} c_{11}a_{11}^{(1)} + c_{12}a_{11}^{(2)} = 0 \\ c_{21}a_{11}^{(1)} + c_{22}a_{11}^{(2)} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

where

$$\begin{aligned} c_{11} &= B_1 \frac{l_1^2}{2\pi^2} \left[-1 + \frac{2}{\pi} - \eta^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \\ &+ B_2 \frac{l_1^4}{2\pi^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \eta^2 \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) + 1 \\ c_{12} &= B_1 \frac{l_1^2}{2\pi^2 \eta^2} \left[-1 + \frac{2}{\pi} - \frac{1}{\eta^2} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \\ &+ B_2 \frac{l_1^4}{2\pi^4} \frac{1}{\eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{\eta^2} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) + 1 \\ c_{21} &= 1 \\ c_{22} &= -1/\eta^4. \end{aligned}$$

The unknown values included in the system of defining functional equations have a non-zero value only if the main determinant is equal to zero; based on this condition, it is possible to obtain a characteristic equation that can be resolved with respect to the natural vibration frequencies of a flat structure:

$$d_1 \xi^4 + d_2 \xi^3 + d_3 \xi^2 + d_4 \xi + d_5 = 0, \quad (13)$$

where

$$d_1 = -\frac{A_2}{A_4} \frac{l_1^4}{\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{b}{h} \right)^4$$

$$d_2 = -\frac{A_6}{A_4} \frac{l_1^4}{\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{b}{h} \right)^3$$

$$d_3 = -\frac{l_1^2}{A_4 \pi^2 \eta^2} \left\{ \frac{A_3}{2} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{\eta^2} + 2 \right) - \left(\frac{1}{\eta^2} + 1 \right) \left(2 - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \left(\frac{b}{h} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

$$d_4 = -\frac{l_1^2}{A_4 \pi^2 \eta^2} \left\{ \frac{A_7}{2} \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{\eta^2} + 2 \right) - \left(\frac{1}{\eta^2} + 1 \right) \left(2 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + A_5 \frac{l_1^4}{\pi^4 \eta^4} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right\} \left(\frac{b}{h} \right)$$

$$d_5 = \frac{2}{\eta^2} \left(-1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{1}{\eta^4} - 1$$

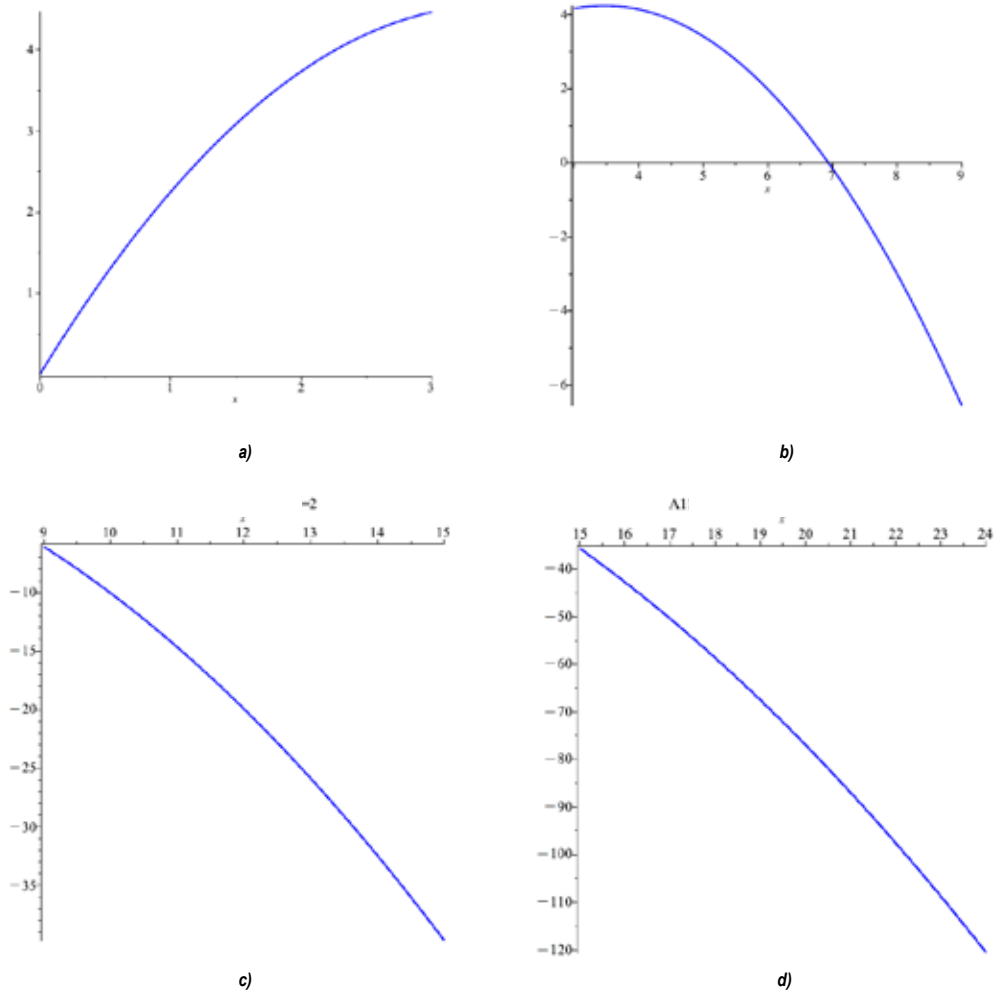
If we replace an infinite extended flat element with a plate with finite dimensions, then we can add boundary conditions along the faces to the described equations; in this case, we can obtain a characteristic equation for the natural frequencies. By varying the parameters A_i and bringing them into line with the geometric and mechanical characteristics of the actual structure of the railway track, it is possible to obtain not only a mathematical solution to the engineering problem of deformation of the track superstructure under a moving dynamic load, but also to test various elements and procedures of technological processes for maintaining the railway track [29–30].

After determining the frequencies of natural vibrations, it is possible to construct and analyse graphical dependencies for vertical movement of points on the median surface of a flat element modelling a segment of a railway track. Vertical movement is calculated according to relations (3) and in fact represents the sum of all possible vertical movements (subsidence, settlement, skew brought to one of the track rails, etc.). The obtained values can be compared with the sum of some values that contribute to the vertical movement of waypoints and are determined by the track-measuring (geometry) car.

DISCUSSION

The described mathematical model can be applied for practical calculations of the design of the track within a section of variable stiffness.



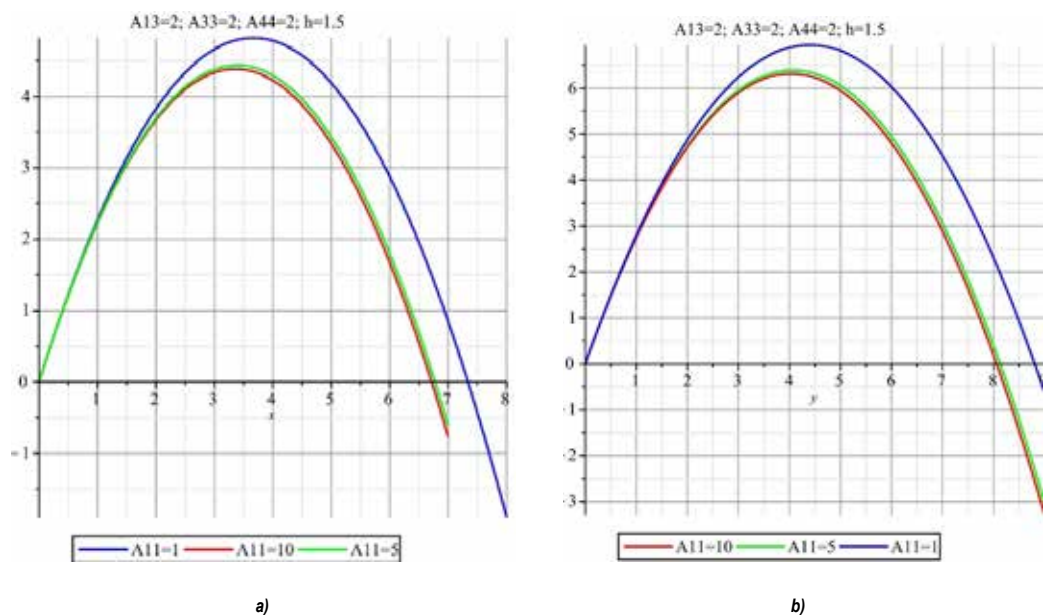


Pic. 3. Graphs of dependence of $W(x)$ on the length of a section of variable stiffness:
a) $x = 0-3$ m, b) $x = 3-9$ m, c) $x = 9-15$ m, d) $x = 15-24$ m for the values $A_{11} = 2$, $A_1 = 1$, $A_{33} = 2$ and $A_{44} = 2$ [graphs are constructed with participation of the author]:
 A – anisotropy coefficient; vertical axis (W) – value of rail deflection, mm; horizontal axis (X) – coordinates of the measured point on the track rail counted from the start point of the considered segment, m.

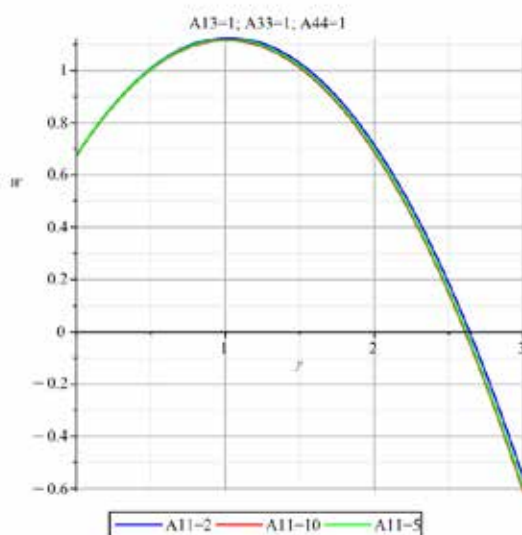
The first graphs (Pic. 3a, b) show the dependence of vertical displacement on the location coordinate of the studied point of the structure along the rail line. The results obtained make it possible to determine the locations of the largest and smallest displacements under a dynamic load, as well as to calculate the optimal size of a segment of the railway track structure (this can be a reinforced concrete slab, box culvert, caisson, etc.) from the point of view of minimising displacement when fixing mechanical (elastic modulus, shear modulus, Poisson's ratio, etc.) and stiffness (flexural, shear stiffness, cylindrical stiffness, etc.) parameters, which is one of the main characteristics of operation of the railway track.

For the parameters specified for calculations (as values of maximum displacement the maximum values indicated in Russian and foreign regulations can be used; they are about 10 mm), the largest deflection was observed at a point with a coordinate of 3 m, and the smallest was recorded at a point with a coordinate of 6,8 m; thus, this is the range, where the dimensions in plan for structural elements reinforcing the section of the track in front of or behind an artificial structure or in other places with increased draft of the railway track should be located.

A series of other graphical dependencies shows the influence of anisotropy coefficients in three main directions on the vertical deflection.



Pic. 4. Graphs of dependence of: a) $W(x)$ and b) $W(y)$ on different sets of A_{11} values [graphs are constructed with participation of the author]: A – anisotropy coefficient; vertical axis – a) $W(x)$ – dependence of the deflection on the value of displacement along the rail, mm; b) $W(y)$ – dependence of the deflection on the value of vertical displacement, mm; horizontal axis (X) – coordinates of a measured point on the rail, m.



Pic. 5. Graph of $W(y)$ when changing A_{11} values [graph is constructed with participation of the author]: A – anisotropy coefficient; vertical axis – $W(y)$ – dependence of the deflection on the change in stiffness along the rail, mm; horizontal axis (y) – coordinates of a measured point in direction transversal from the track axis, m.

The argument, as in the previous case, is the coordinate of the desired point of the structure, measured along the rail line from the beginning of the segment in question (in fact, this is the beginning of the reinforced concrete box culvert). By comparing individual curves, one can note the contribution of the anisotropic properties of the railway track structure to the final value of the vertical displacement. It can be seen in Pic.

4a that even doubling the normalised anisotropy parameter along the rail has little effect on the overall value of the deflection.

With an increase in stiffness along the rails, the dependence of the displacement on the coordinate from the moment the maximum value occurs is actually parallel in its characteristic feature with the previous values; this indicates the linearity of the influence of the changed



parameters. The influence of anisotropy in the vertical direction (Pic. 4b) is more interesting from the point of view of the behaviour of the deflection function; the presented graphs of $W_{(y)}$ intersect with each other at almost one point, the magnitude of the deflection at which practically does not depend on the parameters of adhesion of horizontal layers to each other (this characteristic exactly can be increased by using piles or other dowel structures), but depends on the cylindrical stiffness of the reinforced concrete box culvert itself.

The $W_{(y)}$ graph when changing A11 (Pic. 5) also shows the insignificant influence of changes in stiffness along the rail line on the final value of the vertical deflection. An interesting result is the point where the deflection is equal to zero; in fact, it means the geometric size of the box culvert in plan and can vary for a single track and a double-track section of the railway.

CONCLUSION

The arrangement of a section of transitional stiffness at the approaches to artificial structures is a necessary element to reduce the risk of residual deformations and to create prerequisites for reducing the costs of the current maintenance of the railway track in the areas of approaches to the artificial structures. The installation of such structures is especially important in areas of high-speed and heavy traffic.

The paper has considered the axisymmetric problem of modelling the design of a section of variable stiffness built with bottomless box culverts, corresponding to a straight section of a railway track. By specifying the maximum value of the vertical displacement specified in domestic and foreign regulatory documents, it is possible to select the required structural stiffness parameters for a section of variable stiffness in three main directions of anisotropy, that will allow to proceed with further research on the structural features of the design and construction of these structures.

REFERENCES

1. Serebryakov, D. V., Konon, A. A., Ganchits, V. V. Study of oscillatory processes in the roadbed at the sections interfacing the bridges [*Issledovanie kolebatelnykh protsessov v zemlyanom polotne na uchastkakh sopryazheniya s mostami*]. *Put i putevoe khozyaistvo*, 2017, Iss. 9, pp. 9–11. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30026800>. EDN: ZHBZLF [limited access].
2. Ivanova, K. I., Kolos, A. F., Wang Xintong. Modulus of elasticity of non-ballasted track. *BRICS Transport*, 2023, Vol. 2, Iss. 1, pp. 1–7. DOI: 10.46684/2023.1.4.
3. Jones, C. J. Earth reinforcement and soil structures. [Russian edition. Trans. from English by V. S. Zabavin; Ed. by V. G. Melnik]. Moscow, Stroyizdat publ., 1989, 281 p. ISBN 5-274-00475-X.
4. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO. German Geotechnical Society, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Germany, 2011 (first published 09.01.2012). Print ISBN: 9783433029831. DOI: 10.1002/9783433600931 [partially limited access].
5. Olkhovskaya, E. V., Serebryakov, D. V. Design of the transition track on the approaches to artificial structures on higher speed and high-speed railways [*Konstruktsiya perekhodnogo puti na podkhodakh k iskusstvennym sooruzheniyam na skorostnykh i vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh*]. *Proceedings of LXXXII All-Russian scientific and technical conference of students, Ph.D. students and young scientists*, in two volumes. Vol. 1. Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (St. Petersburg), 2022, pp. 47–50. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/dmmclz> [metadata].
6. Merenchenko, K. V. New approaches to the track design in the interface area of the roadbed and engineering structures. *Transport construction*, 2014, Iss. 6, pp. 7–9. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21673959> [metadata].
7. Fischer, S. Investigation of the Horizontal Track Geometry regarding Geogrid Reinforcement under Ballast. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2022, Vol. 19, Iss. 3, pp. 89–101. DOI: 10.12700/APH.19.3.2022.3.8.
8. Altynnikov, D. S. Comparative analysis of structures for strengthening sections of variable stiffness on approaches to artificial structures on railways [*Sravnitelnyy analiz konstruktsii dlya usileniya uchastkov peremennoi zhestkosti na podkhodakh k iskusstvennym sooruzheniyam na zheleznnykh dorogakh*]. *Proektirovanie razvitiya regionalnoi seti zheleznnykh dorog*, 2017, Iss. 5, pp. 32–39. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=ztihtfp>. EDN: ZTIHFP. Last accessed 26.05.2023.
9. New designs of transition sections from the embankment to the bridge. 760/4. Organization for Cooperation between Railways (OSJD) [In Russian], Effective date: October 21, 2016, 35 p. [Electronic resource]: <https://osjd.org/api/media/resources/11613>. Last accessed 26.05.2023.
10. Fedorenko, E. Calculations of settlement and stability of roadbeds with geosynthetic materials using numerical modelling [*Raschety osadki, ustoiчивosti i stabilnosti zemlyanogo polotna s geosinteticheskimi materialami putem chislennogo modelirovaniya*]. *Inzhenernaya zashchita*, 2014, Iss. 3 (3), pp. 34–38. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23144482>. Last accessed 26.05.2023.
11. Apshikur, B., Ipalakov, T. T., Kasymov, D. K. Calculation of the stress-strain state of the roadbed reinforced with geosynthetic materials [*Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemlyanogo polotna, usilennogo geosinteticheskimi materialami*]. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva*, 2019, Iss. 2, pp. 18–26. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44348774>. EDN: PRKKOA. Last accessed 26.05.2023.
12. Druzhinina, O. V., Loktev, A. A., Vanyushanik, I. S., Fedorova, S. V., Klimova, D. V. Generalized reaction spectra for the design of bridge crossings of transport infrastructure [*Oboshchennye spektry reaktsii dlya proektirovaniya mostovykh perekhodov transportnoi infrastruktury*]. In: Control systems, complex systems: modelling, stability, stabilisation, intelligent technologies. Proceedings of VII International scientific and practical conference, Elets,

2021, pp. 329–334. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46685164> [metadata and full text of the proceedings]. Last accessed 26.05.2023.

13. Loktev, A. A., Sycheva, A. V., Sychev, V. P. Solution of the problem of equality of deformations of viscous and elastic elements of the under-rail foundation of a railway track [*Reshenie zadachi ravenstva deformatsii vyazkikh i uprugikh elementov podrelsovoogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti*]. *Vnedrenie sovremennykh konstruktivnykh i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo*, 2022, Vol. 18, pp. 62–71. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50120155>. Last accessed 26.05.2023.

14. Loktev, A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*, 2011, Vol. 222, art. 17. DOI:10.1007/s00707-011-0517-8 [limited access].

15. Sycheva, A. V., Loktev, A. A., Sychev, V. P. Controlling track stiffness in transition sections [*Upravlenie zhestkostyu puti na perekhodnykh uchastkakh*]. *Puti i putevoe khozyaistvo*, 2021, Iss. 2, pp. 16–20. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44717335>. EDN: BDXXXI [limited access].

16. Dzhannuldaev, B. D., Loktev, A. A., Alenov, K. T., Fazilova, Z. T. Transverse Oscillation of a Base Slab Section of Ballastless Track. *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 2 (81), pp. 72–78. DOI:10.30932/1992-3252-2019-17-2-72-78.

17. Vinogradov, V. V., Loktev, A. A., Fazilova, Z. T. Mathematical Modelling of Sections of Variable Rigidity in Front of Artificial Structures. *World of Transport and Transportation*, 2018, Vol. 16, Iss. 3, pp. 72–85. DOI:10.30932/1992-3252-2018-16-3-7.

18. Ashpiz, E. S., Zamukhovskiy, A. V., Shmakov, A. P., Salmin, A. O., Kuznetsova, A. V. Study of the reinforcement of the protective layer with a flat geogrid [*Issledovanie armirovaniya zaschitnogo sloya plozkoj geoshotkoi*]. In: Modern problems of design, construction and operation of railway tracks. Proceedings of XIV International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G. M. Shakhunyan, 2017, pp. 112–115. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xpqqx> [metadata and full text of the readings]. Last accessed 26.05.2023.

19. Danyang Ji, Zheng Ma, Junjie Zhou, Yajun Li, Shuai Shao. A Coupled Discrete-Finite Element Method for Shear Strength Analysis of Geogrid-Reinforced Railway Ballast. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, art. ID 3685709. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/3685709>.

20. Shapran, V. V. Design and reconstruction of track sections with variable stiffness [*Proektirovaniye i rekonstruktsiya uchastkov puti s peremennoi zhestkostyu*]. *Vnedrenie sovremennykh konstruktivnykh i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo*, 2013, Vol. 6, Iss. 6 (6), pp. 124–131. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27034714>. EDN: WTPPUX. Last accessed 26.05.2023.

21. Marochka, V. V., Boboshko, S. G., Tyutkin, A. L. Full-scale testing of sections with a transition stiffness indicator on the approaches to railway bridges [*Naturnie ispytaniya uchastkov s perekhodnym pokazatelem zhestkosti na podkhodakh k zheleznodorozhnym mostam*]. In: Polytransport systems. Proceedings of XI international scientific and technical conference, Novosibirsk, 2020, pp. 59–63. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/>

[item.asp?id=44896409&pff=1](https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896409&pff=1). EDN: VPUORU [metadata and full text of the proceedings]. Last accessed 26.05.2023.

22. Loktev, A. A., Fazilova, Z. T., Zaytsev A. A., Borisova, N. L. Analytical Modeling of the Dynamic Behavior of the Railway Track on Areas of Variable Stiffness. In: *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, Vol. 1. Proceedings of TRANSOILCOLD 2019 (Part of the Lecture Notes in Civil Engineering Book series, Vol. 49), 2020, Vol. 1. pp. 165–172. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_17 [limited access].

23. Illarionova, L. A., Loktev, A. A., Bokov, S. S. Dynamic impact of the vehicle on the visco-elastic base plate of urban transport [*Dinamicheskoe vozdeistvie ekipazha na vyazko-upruguyu plitu osnovaniya gorodskogo transporta*]. *Nauka i tekhnika transporta*, 2023, Iss. 1, pp. 52–56. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=chmokl>. EDN: CHMOKL. Last accessed 26.05.2023.

24. Loktev, A. A., Sycheva, A. V., Sychev, V. P. Justification of the effect of slowing of an elastic wave from the impact of rolling stock wheels on the rail with localisation of the wave in the defect zone of the railway track [*Obosnovanie efekta pritormazhivaniya uprugoi volny ot vozdeistviya koles podvizhnogo sostava na rels s lokalizatsiei volny v zonu dvizhka zheleznodorozhnogo puti*]. *Nauka i tekhnika transporta*, 2022, Iss. 3, pp. 25–30. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49518278>. EDN: ZXFZPY. Last accessed 26.05.2023.

25. Illarionova, L. A., Loktev, A. A. Anisotropic structures in construction and repair of railway infrastructure [*Anizotropnie konstruktivnyye pri stroitelstve i remonte zheleznodorozhnoi infrastruktury*]. *Vnedrenie sovremennykh konstruktivnykh i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo*, 2021, Vol. 17, Iss. 17, pp. 55–60. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45795349>. EDN: KSSAYK. Last accessed 26.05.2023.

26. Kogan, A. Ya. Track dynamics and its interaction with rolling stock [*Dinamika puti i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom*]. Moscow, Transport publ., 1997, 326 p. ISBN 5-277-02025-X.

27. Smirnov, V. N., Shestakova, E. B., Chizhov, S. V., Antonyuk, A. A., Lediaev, L. A., Indeykin, I. A., Evtukov, E. S. Dynamic interaction of high-speed trains with span structures and flexible support. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, Iss. 8 (76), pp. 115–129. DOI: 10.18720/MCE.76.11.

28. Chattopadhyay, S. Permanent indentation effects on the impact response of elastic plates. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, Vol. 82, Iss. 2, pp. 493–497. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.395450> [limited access].

29. Loktev, A. A., Gridasova, E. A., Zapol'nova, E. V. Simulation of the railway under dynamic loading. Part 1. Ray method for dynamic problem. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, 8 (17–20), pp. 799–807. DOI:10.12988/CES.2015.57204.

30. Loktev, A., Sychev, V., Gridasova, E., Stepanov, R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters. Chapter in: Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. [Eds.]: Uvarova, L. A., Nadykto, A. B., Latyshev, A. V. Series: *Theoretical and Applied Mathematics*, 2017, Vol. 1, pp. 291–307. [Electronic resource]: <https://novapublishers.com/shop/nonlinearity-problems-solutions-and-applications-volume-1/> [limited access].

Information about the author:

Fazilova, Zulfiya T., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Transport Construction of Russian University of Transport, Moscow, Russia, fazil_1905@mail.ru.

Article received 26.05.2023, approved 23.06.2023, accepted 10.07.2023.





Rubble Sandstone Unloading and Screening Unit with Non-Volatile Auxiliary Equipment Drive



Alyona Yu. Lyashenko

*Shakhty Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University,
Shakhty, Rostov region, Russia.*

✉ alyona_lyashenko@mail.ru.

Alyona Yu. LYASHENKO

ABSTRACT

For the road industry, it is quite important to reduce costs and energy consumption, as well as energy recovery in process plants. To solve this problem at one of the stages of the industrial process, which is production of road metal, an important material for road construction, it is proposed to develop autonomous power unit based on recuperation of the kinetic energy of dump trucks, namely a unloading and screening unit of crushing and screening plant with non-volatile drive of auxiliary equipment.

A non-volatile unloading and screening unit separates the feedstock at the primary stage of production in a non-volatile operating mode, using recovery of the kinetic energy of trucks been unloaded. After loading rubble sandstone into the receiving hopper, the unit activates the process of material segregation into coarse and fine fractions. The respective fractions are fed to the appropriate feeders for subsequent technological processing. The advantage of the unit is the autonomy of the vibrator and feeders' drives, which helps to raise the efficiency

of the process of unloading and separation of the rubble sandstone and reduce energy costs for production of the finished product.

The evaluation of the functional capabilities of the non-volatile hydraulic drive of the unloading and screening unit was carried out for hydraulic motors of the screening and conveying equipment. The apron feeder of KM PP-2–10–60B type providing a continuous and uniform supply of feedstock was assumed as the basic equipment, and the volume of working fluid in the hydraulic accumulator supplied by hydraulic jacks was calculated. The results showed that two hydraulic jacks with the specified parameters can provide the required flow and allowed determining the amount of energy stored in the accumulator during feedstock loading. The calculated power of the hydraulic motor allows its use in the feeder. The economic efficiency of the installation with an autonomous drive is estimated considering the mode of operation, the number of shifts and the tariff for electricity.

Keywords: road transport, road construction, rubble sandstone, crushing and screening plant, unloading and screening unit, separation process, recovery process, autonomous power plants.

For citation: Lyashenko, A. Yu. Rubble Sandstone Unloading and Screening Unit with Non-Volatile Auxiliary Equipment Drive. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 20, Iss. 3 (106), pp. 206–212. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-5>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The road industry is one of the most important sectors of the economy of any country possessing motorways. Crushed stone or road metal is the most widely used product of extraction and processing of non-metallic building materials in the road industry. The crushed stone production technology includes two main stages: the primary stage is extraction of rubble stone, and the second is the processing of rubble stone into crushed stone.

Processing quarried rubble sandstone involves crushing and screening plant (CSP). CSP is designed for primary processing and preparation of the extracted rubble sandstone for industrial use.

Reducing the unit cost of products of crushing and screening plants is a priority task implemented during development of new equipment. Its solution along with a growth of competitiveness leads to an increase in the sale of high-strength crushed stone and sand separated during rubble sandstone crushing process. The analysis of the tasks to be solved in the field of crushing and screening equipment shows that reducing energy consumption costs is the most significant one ^{1, 2}. After all, it is

energy costs that make up the largest share in the total cost of a unit of manufactured products [1; 2].

One of the effective ways to reduce the energy consumption of mineral processing processes is implementation of the recovery process in technological installations, which makes it possible to save part of the energy in the form of generated and accumulated kinetic energy, and return it back to the technological chain^{3, 4}.

The increase in the amount of recuperated energy is hampered by several factors, among which the following can be distinguished: the lack of recuperation energy receivers in some cases and the insufficient use of available redundant capacity of technologies being implemented.

The development and implementation of autonomous power plants based on the principle of recovery of kinetic energy of dump trucks delivering rubble sandstone to the receiving hopper of the crushing and screening plant for further processing is one of the innovative ways to solve the problem.

The *objective* of the article is to present the proposals developed by the author to create non-

¹ Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035. Decree of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020, № 1523-r. Moscow, 2020, 93 p. [Electronic resource]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003>. Last accessed 28.05.2023.

² Quarry producers of crushed sandstone in Rostov region. [Electronic resource]: <https://nedra61.ru/proizvoditeli-shebnya-peschanika>. Last accessed 28.05.2023.

³ Korchevsky, A. N., Nazimko, E. I., Serafimova, L. I., Naumenko, V. G. Preparatory processes in mineral processing. Crushing, grinding, screening and classification: Study guide. Donetsk, 2017, 180 p. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/books/18315>. Last accessed 28.05.2023.

⁴ Tikhonov, O. N. Mineral Separation Theory: Textbook for High Schools. St.Petersburg, SPSSI (TU), 2008, 514 p. ISBN 978-5-94211-309-4. [Electronic resource]: <https://www.geokniga.org/books/19923>. Last accessed 28.05.2023.

Table 1

Granulometric composition of rubble sandstone specified for drilling boreholes with rigs of SBU-100G and SBSH-250 MN types [3]

SBU-100G		SBSH-250 MN	
Fraction size, mm	Fraction content, %	Fraction size, mm	Fraction content, %
0÷5	2	0÷10	1
5÷20	9	10÷20	2
20÷40	12	20÷25	1
40÷60	9	25÷60	3
60÷70	4	60÷100	5
70÷80	3	100÷150	6
80÷180	22	150÷200	4,7
180 and more (up to 300)	39	≥ 200	77,3



volatile hydraulic drive of unloading and screening unit using examples of two hydraulic motors of screening and conveying equipment, to assess functional capability of the proposed solution, followed by relevant technical and economic estimate.

RESULTS

Description of the Proposed Non-Volatile Unloading and Screening Unit

In rubble sandstone used for production of crushed stone, the number of pieces that do not exceed the average size reaches 50 % in the total volume (Table 1) [3].

It is economically inexpedient to supply the entire feedstock by the feeder of the loading hopper of the crushing and screening plant to the primary crusher, particularly pieces that do not exceed the average size [4–15].

The technical result of the proposed development is an increase in the efficiency of the receiving hopper due to its transformation into an unloading and screening unit that separates the feedstock at the initial technological stage of crushed rubble sandstone production in a non-volatile operating mode due to recovery of the kinetic energy of unloaded vehicles.

In the proposed energy-independent unloading and screening unit, the platform for the entrance of vehicles (Pic. 1) is made in the form of a turntable platform 1 and rests on hydraulic jacks 2. In the receiving hopper 3, to implement the separation functionality of the descent wall 4, a curved S-shaped surface is used, which is fixed on the side walls of the hopper with a hinge. For a more efficient and smooth descent of the material, the descent wall 4 is equipped with a shock absorber 5 with a vibrator, which includes a hydraulic motor 6 and a balance weight 7 on the shaft. To regulate the speed of particles rolling down the descent wall 4, transverse elements 17 are fixed at an equal distance from each other. In the conveyor bottom 8 of the receiving hopper 3, a two-feed system 9 and 10 is installed with drives which are hydraulic motors 11 and 12.

The hydraulic jacks 2 of the turntable platform 1 are connected by a hydraulic line 13, equipped with a non-return valve 14, to a hydraulic accumulator 16 through a three-position distributor 15.

The receiving-segregation unit is used as follows. Before the start of operation of the receiving separation unit, the rods of hydraulic jacks 2 are extended. Turntable platform 1 is set at an angle to the horizon. The three-position distributor 15 is in the neutral position, which ensures the connection of the hydraulic jacks 2 with the hydraulic accumulator 16.

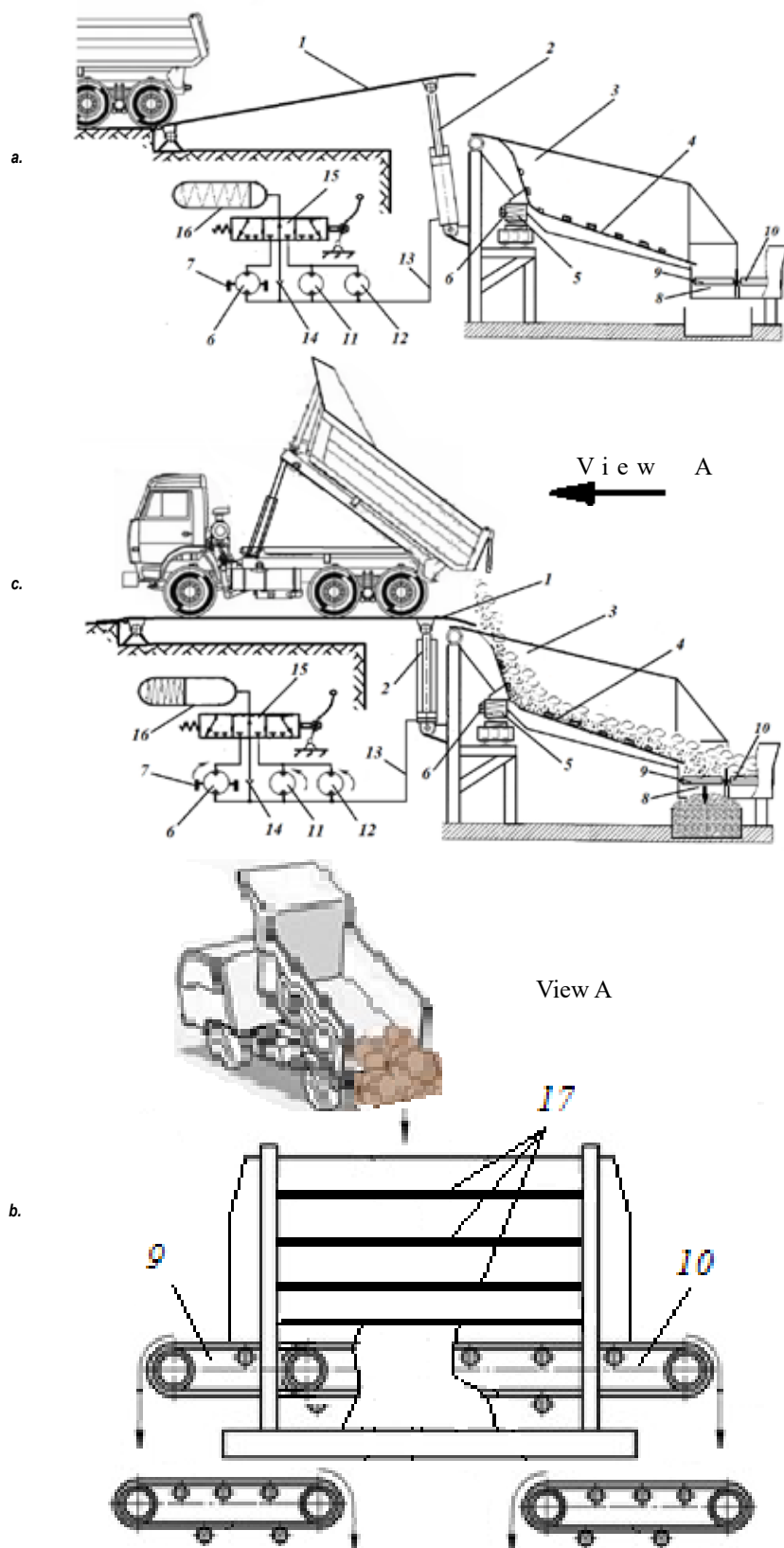
Under the weight of dump trucks with the feedstock, while they are moving on the platform to the point of loading of the receiving hopper 3, the turntable platform 1 acts on the rods of the hydraulic jacks 2, sets them in motion and the rods are retracted. At the same time, the working fluid is displaced from the piston cavity and enters the hydraulic accumulator 16 through the hydraulic line 13, which ensures its charging.

After loading the feedstock into the receiving hopper 3, the vehicles move off the platform. At the same time, the non-return valve 14 closes the hydraulic line and prevents spontaneous discharge of the hydraulic accumulator 16.

To start feedstock particles roll along the descent wall 4, the distributor 15 is transferred to the left working position. This ensures the connection of the hydraulic accumulator 16 through the distributor 15 with the hydraulic motor 6 and further with the hydraulic jacks 2 and the outflow of the working fluid from the hydraulic accumulator 16 into the hydraulic jacks 2. The rods of the hydraulic jacks 2 begin to extend, the platform 1 turns. A vibrator in the form of a hydraulic motor 6 with a balance weight 7 installed on the shaft creates vibrations. The vibrations are transmitted through the shock absorber 5 to the descent wall 4.

Under the influence of gravitational force, the feedstock with large and small particles moves down, due to vibration and friction, large particles rise, while small ones remain on the surface of the descent wall 4. Transverse elements 17, located along the entire path of movement of small particles, slow down their speed, which improves separation and improves the quality of the final product.

As a result of this process, small particles, reaching the lower edge of the descent wall 4, move at a lower speed, in contrast to large pieces, which roll down at a much higher speed. Due to this, small particles fall on the feeder 9, and larger particles – on the feeder 10, which feed the corresponding fractions



Pic. 1. Structural-hydraulic scheme of the unloading and screening power unit: a – initial state; b – loading of the receiving hopper; c – the same, view A.

Table 2

Technical characteristics of the KM PP-2–10–60B plate feeder

Hopper capacity, cu. m	20
Maximum size of a piece of transported material, mm	500
Productivity, m ³ /h	75
Bed width, mm	1000
Bed speed, m/s	0,08
Engine power, kW (two-speed)	2,8
Number of revolutions, rpm	500
Reducer	1 C2U-250–40–12 U2
Feeder weight (with drive and without hopper), kg	16000
Distance between the axes of the drive and tension shafts, mm	6000
Height – without hopper	3300
Width – without hopper	3580
Length – without hopper	7800

of the material to the conveyors of the subsequent technological chain. In this case, the feeder 9 is designed to supply material that does not exceed the average size, while the feeder 10 ensures the supply of a larger fraction of the material.

To supply separated material by feeders 9 and 10, distributor 15 is transferred to the right working position. This ensures the connection of the hydraulic accumulator 16 through the distributor 15 with hydraulic motors 11 and 12 and further with the hydraulic jacks 2. The energy accumulated in the hydraulic accumulator 15 by the flow of the working fluid ensures the start of the hydraulic motors 11 and 12 and the conveying bodies of feeders 9 and 10 kinematically associated with them.

Thus, the proposed unloading and screening power unit with structural elements for generating and accumulating energy in the process of loading feedstock into the hopper differs favourably from existing analogues in that its design ensures that the vibrator and feeder drives are autonomous and thus helps to reduce energy costs for production of a unit of finished product.

Evaluation of Functionality of a Non-Volatile Hydraulic Drive of the Unloading and Screening Unit

To assess the possibility of equipping the separation and conveying nits of the plant with hydraulic motors in its non-volatile operating mode, the calculation of the parameters of the elements of an autonomous hydraulic drive⁵ was performed (Pic. 2).

The plate feeder of KM PP-2–10–60B type was taken as the basic equipment⁶ (Pic. 2).

The KM PP-2–10–60B plate feeder is used by mining, ore-dressing and construction enterprises to ensure continuous and uniform

⁵ Popova, O. I., Popova, M. I., Novokshchenov, S. L. Volumetric hydraulic drive calculation: Study guide [Electronic resource]. Electronic text and graphical data (2,0 Mb). Voronezh, FSBEI Voronezh State Technical University, 2019, 88 p. [Electronic resource]: https://bf.cchgeu.ru/upload/iblock/ea1/g8hwpv5yeupy482r9bieh1fohl3rzwy3/UP_Raschet-gidroprivoda_MZHiG.pdf. Last accessed 28.05.2023.

⁶ Kanmash KM PP-2–10–60 B: technical characteristics, description, review. [Electronic resource]: https://exkavator.ru/excapedia/technic/kanmash_km_pp-2-10-60_b. Last accessed 28.05.2023.



Pic. 2. Calculation scheme of the hydraulic drive of the plate feeder.

supply of loose large-sized, clay materials without preliminary selection of smaller pieces (Table 2).

To ensure the given speed of rotation of the hydraulic motor n_{hm} , the flow rate of the working fluid Q_{hm} (cm³/min) is required:

$$Q_{hm} = n_{hm} \cdot V_{hm} / \eta_v,$$

where $n_{hm} = 500$ – number of revolutions of the hydraulic motor (rpm); $V_{hm} = 10$ – volume of the working chamber of the hydraulic motor (set within the range from 5 cm³ to 250 cm³); $\eta_v = 0,9$ – volume loss coefficient (for hydraulic motors it is within the range 0,85÷0,95).

Substituting the values, we get:

$$Q_{hm} = (500 \cdot 10) / 0,9 = 5555 \text{ cm}^3/\text{min}.$$

Feeder operation time T_f for delivering of bulky bulk material from the hopper, loaded by one dump truck, is determined by the formula (min):

$$T_f = 60 \cdot M_{\text{cargo}} / \rho_s \cdot P_f,$$

where $M_{\text{cargo}} = 15210$ – weight of cargo transported by dump truck,⁷ kg; $\rho_s = 2500$ – volumetric weight of sandstone in loosened state, kg/m³; $P_f = 75$ – plate feeder performance, m³/h. Substituting the values, we get:

$$T_f = 60 \cdot 15210 / 75 \cdot 2500 = 4,87 \approx 5 \text{ min}.$$

The volume of working fluid V_{ha} in the accumulator, which ensures the operation of the hydraulic motor during the time T_f , is determined by the formula (cm³):

$$V_{ha} = Q_{hm} \cdot T_f = 5555 \cdot 5 = 27775 \text{ cm}^3.$$

The supply of working fluid to the accumulator is provided by hydraulic jacks.

Therefore, the volume of the working fluid V_{ha} in the hydraulic accumulator must correspond to the total volume of the piston cavities of the hydraulic jacks ΣV_{hj} :

$$V_{ha} = \Sigma V_{hj} = 0,25 \pi \cdot D_p^2 \cdot S_p \cdot N_{hj},$$

where D_p – hydraulic jack piston diameter, cm; S_p – hydraulic jack piston stroke, cm; N_{hj} – number of hydraulic jacks.

With the number of hydraulic jacks $N_{hj} = 2$ and the piston stroke of the hydraulic jack $S_p = 60$ cm, the diameter of the piston of the hydraulic jack D_p is determined by the formula (cm):

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{ha}}{\pi \cdot S_p \cdot N_{hj}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 27775}{\pi \cdot 60 \cdot 2}} = 17 \text{ cm} \approx 20 \text{ cm}.$$

⁷ Automobile plant «Ural»: Lineup of high-sided vehicles. [Electronic resource]: <https://uralaz.ru/models/>. Last accessed 28.05.2023.

As can be seen from the calculation results, two hydraulic jacks with design parameters – hydraulic jack piston diameter $D_p = 200$ mm; hydraulic jack piston stroke $S_p = 600$ mm are able to provide the necessary supply of working fluid to the hydraulic accumulator.

Let us calculate the amount of energy E accumulated in the hydraulic accumulator of the proposed unit when loading material into the hopper, according to the formula (J):

$$E = M_A \cdot g \cdot S,$$

where $M_A = 26500$ – vehicle gross weight, kg; $g = 9,8$ – acceleration of gravity, m/s²; $S_p = 0,6$ – hydraulic jack piston stroke, m.

Substituting the values, we get:

$$E = 26500 \cdot 9,8 \cdot 0,6 = 155820 \text{ J}.$$

The amount of energy accumulated in the hydraulic accumulator ensures the operation of the feeder hydraulic motor with a power of N_{hm} (W):

$$N_{hm} = E / (60 \cdot T_f) = 155820 / (60 \cdot 4,87) = 533,26 \text{ W} \approx 0,5 \text{ kW}.$$

Economic Efficiency

Assessing the economic efficiency of the unit with an autonomous drive of the plate feeder, we accept: D_{uy} – operating mode of the unit per year, 260 days; N_{sh} – number of shifts per day, 2 shifts; t_{sh} – duration of a shift per day, 8 hours; T_{el} – the tariff for electricity is 5,1 rubles / kWh.

The annual economic efficiency E , from introduction of an installation with an autonomous drive of the plate feeder, is, rub. / year:

$$E = N_f \cdot D_{uy} \cdot N_{sh} \cdot t_{sh} \cdot T_{el} = 0,5 \cdot 260 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 5,1 = 10608 \text{ rub./year}.$$

CONCLUSIONS

1. The proposed unloading and screening power unit of the crushing and screening plant, having a constructive novelty, in the process of supplying vehicles along the platform to the place of loading of the receiving hopper, allows generating and accumulating kinetic energy and subsequently returning it back to the technological chain.

2. The implementation of the recovery process in the unloading and screening power unit ensures that the drives of the vibrator and the feeders of the hopper with the descent vibration and separation wall are autonomous and thus helps to reduce energy costs for production of a unit of the finished product.



3. With a 2.8 kW motor installed on the feeder, the energy E accumulated in the hydraulic accumulator of the proposed unit is clearly not enough. The result obtained involves the search for new solutions to increase the energy component of the proposed autonomous drive of the plate feeder.

REFERENCES

- Stepanov, V. M., Kuzmina, S. V. Power recovery device [Ustroistvo rekuperatsii elektroenergii]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, Iss. in 5 parts. Tula, TulGU Publ., 2010, pp. 79–80. [Electronic resource]: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2010_03_part_5.pdf [full text of the issue]. Last accessed 28.05.2023.
- Lyashenko, Yu. M., Ryzhikov, V. A., Revyakina, E. A., Lyashenko, A. Yu., Zubrilova, A. M. Rationale justification of a design of system of recuperative braking of the vehicle. *Gruzovik*, 2017, Iss. 2, pp. 3–6. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/xyeooz>. EDN: XYEOOZ. Last accessed 28.05.2023.
- Lyashenko, Yu. M., Lyashenko, A. Yu. Statistical studies of equipment for quarrying extraction of non-metallic materials in the conditions of Rostov region [Statisticheskie issledovaniya oborudovaniya dlya proizvodstva karernykh rabot pri dobyche nerudnykh materialov v usloviyakh Rostovskogo regiona]. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, 2011, Iss. 4, pp. 117–120. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16754079>. EDN: OCQJKN. Last accessed 28.05.2023.
- Blekhman, I. I., Khaiman, V. Ya. On the theory of vibrational separation of granular mixtures [O teorii vibratsionnogo razdeleniya sypuchikh smesey]. *Izv. AN SSR. Mekhanika*, 1965, Iss. 5, pp. 22–30. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25494982>. EDN: TIDAGB [metadata].
- Romashev, O. A., Kuskov, V. B., Lvov, V. V. Intensification of separation of minerals using vibrational segregation [Intensifikatsiya separatsii poleznykh iskopaemykh s ispolzovaniem vibratsionnoi segregatsii]. *Zapiski Gornogo instituta*. St. Petersburg, 2013, Vol. 202, pp. 118–121. [Electronic resource]: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5669/3553>. Last accessed 28.05.2023.
- Alyoshina, A. P., Ogurtsov, V. A., Gritsenko, M. A., Ogurtsov, A. V. Computational and experimental study of the segregation mechanism of migration of an ensemble of particles in a layer of bulk material during vibroscreening [Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie segregatsionnogo mekhanizma migratsii ansamblya chastits v sloe sypuchego materiala pri vibrogrukhochenii]. *Vestnik IGEU*, 2015, Iss. 1, pp. 50–54. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22952930>. EDN: TIHGJZ. Last accessed 28.05.2023.
- Baldaeva, T. M. Efficiency of pre-screening small classes in vibration classification [Effektivnost predvaritelnogo otsesa melkikh klassov pri vibratsionnoi klassifikatsii]. *Obogashchenie rud*, 2017, Iss. 5, pp. 3–6. DOI: 10.17580/or.2017.05.01 [metadata].
- Vibratory machines in construction and production of building materials: Handbook [Vibratsionnye mashiny v stroitelstve i proizvodstve stroitelnykh materialov: Spravochnik]. Team of authors, ed. by V. A. Bauman. Mashinostroenie, 1970, 548 p.
- Lyashenko, Y. M., Voronova, E. Y., Lyashenko, A. Y. Methodical Basics for Calculation of Receiving and Segregation Hopper for Sand Rubble. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering, 2022, pp. 788–798. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_77 [limited access].
- Leeuwener, M. J., Eksteen, J. J. Computational fluid dynamic modeling of two phase flow in hydrocyclone. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2008, Vol. 108, No. 4, pp. 231–236. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/JacobusEksteen-2/publication/290185402_Computational_fluid_dynamic_modelling_of_two_phase_flow_in_a_hydrocyclone/links/58537f1c08ae95fd8e1d7e78/Computational-fluid-dynamic-modelling-of-two-phase-flow-in-a-hydrocyclone.pdf. Last accessed 28.05.2023.
- Laptev, Yu. V. Mining technical factors that determine the regularities of the process of segregation of rocks during dumping [Gornotekhnicheskie faktory, opredelyayushchie zakonomernosti protsessa segregatsii gornykh porod pri otsyрке otvalov]. *Marksheideriya i nedropolzovanie*, 2007, Iss. 1, pp. 33–41.
- Laptev, Yu. V. Study of the dynamics of rock mass unloading from the body of a dump truck [Issledovanie dinamiki vygruzki gornoi massy iz kuzova avtosamosvala]. Ural Mining Forum: Mining. Equipment. Technologies: Collection of reports/ KOSK «Russia». Exhibition Centre; IGD UB RAS. Yekaterinburg, UB RAS, 2006, pp. 133–136.
- Ogurtsov, V. A. Modelling the movement of particles over the surface of a vibrating screen [Modelirovanie dvizheniya chastits nad poverkhnostyu sita vibrogrukhoty]. *Stroitelnye materialy*, 2008, Iss. 8, pp. 72–76. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11762430>. EDN: JXKILN [metadata].
- Karpenko, M. M., Pelevin, L. E., Bogdevičius, M. Prospect of using a hydraulic energy saving drive. Technical technological problems of service, 2017, Iss. 3 (41), pp. 7–12. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312826>. EDN: YMKEIZ. Last accessed 28.05.2023.
- Xiaocong Li, Silu Chen, Chek Sing Teo, Kok Kiong Tan, Tong Heng Lee. Data-Driven Modeling of Control Valve Stiction Using Revised Binary-Tree Structure. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, Vol. 54 (1), pp. 330–337. DOI: 10.1021/ie5031369.

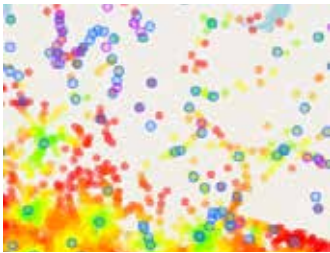
Information about the author:

Lyashenko, Alyona Yu., Ph.D. (Eng), Associate Professor at Shakhty Road Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University, Shakhty, Rostov region, Russia, alyona_lyashenko@mail.ru.

Article received 05.04.2023, approved 30.06.2023, accepted 04.07.2023.



MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS



MOBILITY 214

*Access to domestic air travel:
a hypothesis on assessment
methodology.*



MULTIMODAL TRANSPORT 222

*Grain transportation: small ports
and railways.*

HSR 233

*A typology of development projects:
continuing the study.*





Defining Standard of Access to Domestic Air Travel



Ilya V. Uryupin

Federal Research Centre «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

✉ uryupin93@yandex.ru.

Ilya V. URYUPIN

ABSTRACT

Transport systems, in particular civil aviation, occupy an important place in development of any modern state. The effective design of such systems has a positive impact on the socio-economic component of any country. The quality of the transport system can be assessed through the population's access to it. At present, one of the important problems of long-term development of the air transport system of the Russian Federation is definition of a universal indicator that allows assessing access to transport and its possible target standard.

The article proposes an approach for assessing access to air travel using mathematical modelling. Two indicators are used

as a criterion: a potential number of passengers in the gravitation zones of each airport and a passenger's time being in the system. A methodology for determining the proposed indicators has been developed. The application of the approach of assessment of access to air travel is demonstrated on the 2019 network.

An example of a target (simulated) network of domestic passenger air transportation is also given, which allows to significantly increase access to air travel. Based on the results obtained, the paper proposes target standards for the values of access to air travel for the Russian Federation.

Keywords: air transport system, access to transport, mathematical modelling.

For citation: Uryupin, I. V. Defining Standard of Access to Domestic Air Travel. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 214–221. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-6>.

*The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.*

INTRODUCTION

The socio-economic success of any country directly depends on development and efficiency of its transport systems [1; 2], in particular, of civil aviation. One of the key characteristics of the transport system is availability of access to it [3; 4], and connectiveness [5–7]. There is at least one known attempt by government authorities to set the criteria for availability of transport services in view of long-term development of the transport system. For example, the report¹ states that by 2050, 90 % of citizens of European Union countries should be able to travel door-to-door in no more than four hours. In the form in which the goal of developing the European transport system is formulated, there are three factors: the first principle «from door to door» reflects the so-called holistic approach to the design of transport systems [8]; the second – the target value does not apply to the entire population (about 50 million people will be outside the action of established standards); third – the choice of an absolute temporal value clearly reflects the geographic features of the region. The distance between four capitals in continental Europe farthest from each other (Lisbon, Tallinn, Helsinki, and Athens) does not exceed 3400 km (five hours of flight time).

Unlike other countries, the Russian Federation has not yet developed a single understanding of the criteria for assessing the quality of the transport system, either in an isolated sense – the aviation segment only, or in a general form, including ground sections. Officially approved indicators for the air transport system (ATS),² for example, the mobility rates, the number of routes without transfer in Moscow, are important indicators,

but they do not clearly define the transport quality of the national network.³

At present, the expert community is only discussing approaches to definition of a universal criterion [9–11], which could objectively assess the transport accessibility [12] of ATS and set its target values.

The *objective* of the study is to develop a methodological approach for assessing the access to air travel to determine its target values.

As a single criterion for access to domestic air travel, the author proposes to consider two complementary indicators: *the potential number of passengers and the time of a passenger being in the system*. The first indicator characterises the very possibility of flying to the desired destination: airports at both the initial and final points are accessed and can be reached by road; there are carriers that operate flights to / from the former and latter airport; it is possible to make one or more transfers while travelling. The time indicator describes the ability of ATS to deliver a passenger from one destination to another in a certain time and with no more than a predetermined number of transfers.

Based on *mathematical modelling* [13; 14], using statistical data, a methodology for calculating the proposed indicators of a single access criterion has been developed. An assessment of the access to air travel as for the network in 2019 was obtained. The choice of 2019 is justified by the fact that it most fully reflects the established ATS of the Russian Federation. Next years of 2020–2021 are

¹ European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport, Directorate-General for Research and Innovation, Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs, Publications Office. – 2011. [Electronic resource]: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/296a9bd7-fef9-4ae8-82c4-a21ff48be673/language-en>. Last accessed 23.04.2023.

² Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation, dated 27.11.2021, No. 3363-r. [Electronic resource]: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>. Last accessed 23.04.2023.

³ Ed. note: Besides those emphasised by the author, the Transport strategy highlights many definitions and indicators of development of the transport system, population mobility, including aviation mobility. Thus, the Transport strategy has defined for the first time such terms as «air mobility», «local air transportation», «backbone network of airdromes (airports) of civil aviation», «regional air transportation», «social standard on transport services provided to citizens», «access to transport», etc. Forecasted results of implementation of the Transport strategy include: «the capital of neighbouring federal entity of the Russian Federation should be accessed in no more than 5 hours», «possibility of travelling within 12 hours between all the cities of the Russian Federation with population over 100 000». Indicators of the achievement of the goals of the Transport strategy comprise «aviation mobility of the inhabitants of remote and difficult-to-access areas» with respective target values, etc.





Pic. 1. Exemplification of a map of access of settlements to airfields and heliports [developed by the author].

characterized regarding ATS by changes associated with external factors, e. g., Covid-19.

An example of modelling the target network for 2035 is offered, which makes it possible to improve the values of indicators of access to transport relative to the level of 2019 and set their possible target standard.

RESULTS

Methodology for Determining Access to Transport

The developed methodological approach to determining access to transport involves two stages. At the first stage, by modelling each airport's coverage area, the potential number of passengers entering the ATS is determined. The «coverage area»⁴ refers to the potential number of passengers that can be attributed to a particular airport. The second stage is devoted to the calculation of the time spending per a passenger of a particular airport.

1. The potential number of passengers PP_i of the airport $X_i, i=1, \dots, N$ is determined as the number of residents (as a share of the total population of the country) who have access to the national air transport system:

$$PP_i = \frac{Z_i}{Pop_{RF}}, i=1, \dots, N, \quad (1)$$

where Pop_{RF} – population of the Russian Federation;

Z_i – coverage area of the i -th airport;

$N \in \mathbb{N}^+$ – set of all airports in Russia.

⁴ Ed. note: the term used by the author is to some extent beyond the gravity model but is closer to the meaning of areas for the inhabitants of which an airport is within the reach in reasonable time and, with nuances added, can ensure travel to certain point within a specified time, literally meaning an area where passengers can be collected and transported to the airport, thus terms «airport coverage area» either «airport gravitation zone» are used for translation just in the above sense.

The potential number of passengers in general for the ATS of the Russian Federation can be determined as:

$$PP = \sum_{i=1}^N PP_i, N \in \mathbb{N}^+. \quad (2)$$

In the general case, the size of population the settlement, next to which the airport is located, does not coincide with its gravitation area. In addition, often there may be several airports near the settlement. Therefore, determining the size of the coverage zones $Z_i, i=1, \dots, N$ is singled out as a separate subtask.

To determine the population in the coverage areas, a mathematical model is used [15], in which the time to get to the airport is taken as the main measure of overcoming space. The time of a ride from the settlement to the airfield is determined considering the length of the existing road network. As the upper limit of remoteness of the settlement from the airfield, a great-circle distance of 500 km is assumed. The maximum allowable travel time is limited to five hours. The choice of such a time limit is due to the large extent of the territory of the Russian Federation, as well as to uneven distribution of the population and ground infrastructure facilities. An example is the territory of the Jewish Autonomous District, where there are no airports. The largest and closest airport is Khabarovsk, which is located in another region, while the car trip will take about five hours, which confirms the value of the chosen upper limit.

When modelling, using the weight function [15], alternative airfields located within a radius of 500 km are also considered. The attractiveness of an airfield for a settlement depends on frequency of flights and remoteness, and is expressed in the form of weight coefficients, due to which the population is distributed among the coverage zones of airports.

Pic. 1 shows as an exemplification a fragment of the map developed by the author and referring to the access of settlements (within five hours by road to get to the airport) to flight points. Blue and purple dots indicate airfields and heliports. Green, yellow, orange, and red dots⁵ indicate settlements depending on the distance. For red dots, the airport is not reachable or is reachable in more than five hours by road. Points in the immediate vicinity of airfields are marked in green.

Solving the problem of identifying gravitation areas for each of the country's airports allows solving the main problem: to determine the existing or prospective range of values regarding the access to domestic air travel.

2. Time of a passenger being in the system TS_i for the airport $X_i, i = 1, \dots, N$ is determined as the maximum value of the minimum times, during which it is possible to fly from the given X_i airport to any $X_j, j = 1, \dots, M$ airport from the set $M \subseteq N - 1$ of available airports with at most a given number k of transfers on l routes:

$$TS_i = \max_{j=1, \dots, M} \min_{l=1, \dots, L} T_{ij}^l, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, l = 1, \dots, L, \quad N, M, L \in \mathbb{N}^+.$$

In the formula (3), T_{ij}^l is the time spent on transportation from X_i airport to X_j airport with no more than k transfers; L is the set of possible routes to reach the airport X_j from the given one. Obviously, for a fixed k , there is a probability of getting from X_i to X_j in several ways. The non-uniqueness of the connection is also typical for the direct route ($k = 0$), since there may be several flights that differ both in schedule and in flight time (Pic. 2).

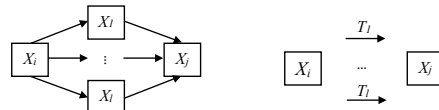
Minimisation in (3) provides a search for the best flight time among all routes with different allowable number of transfers for the pair $X_i \rightarrow X_j$. And maximisation allows getting the upper estimate of the transportation time among the best (minimum) for the airport X_i .

The total travel time T_{ij} for one of the possible l routes with k transfers can be determined as:

$$T_{ij} = \sum_{n=0}^k (t_n + \tau_n), \quad (4)$$

where t_n – flight time on one of the route segments;

⁵ Ed. note: coloured version is available on the Website.



Pic. 2. An exemplification of the non-uniqueness of routes from X_i to X_j (it is not a result, but explanatory illustration [compiled by the author]).

τ_n – flight waiting time.

In equation (4), if time of a direct flight between any two airports can be obtained from statistical data, for example, the regular schedule of domestic air transportation, then determining the allowable waiting time for a flight τ_n becomes an additional task.

So, the flight waiting time before the flight and route segments can be calculated from the annual frequencies on the lines for X_i airport of departure as the ratio of the number of days in a year to the number of flights performed. Then the flight waiting time for the i -th airport can be determined as:

$$\tau_i = \frac{365 \cdot T}{R_{ij}}. \quad (5)$$

In (5) $T = \{0; 12; 24\}$ – is transit capacity (throughput) factor (total for the system);

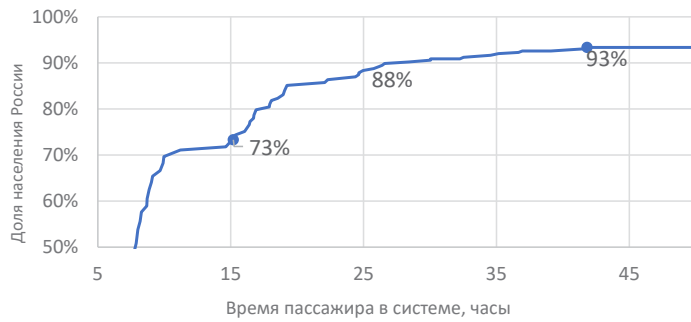
R_{ij} – number of flights on a route segment ($k > 0$) or a direct line ($k = 0$) from X_i to X_j .

The transit capacity coefficient allows getting the waiting time under three aspects: at 0 – there is no waiting time for the flight; at 12 – waiting time equal to the average time; at 24 – the maximum waiting time. In other words, these three aspects correspond: the first to a perfectly synchronised schedule throughout the system (without waiting), the second to partially synchronised (multi-segment flights with a network carrier on most segments); the third is the most unbalanced schedule (commercial connectivity of the network is completely absent).

As an alternative estimate of the flight waiting time, a range of values from 40 to 180 minutes can be used. According to,⁶ the lower limit of the transfer window, that is MCT – minimum connection time, is about 30–40 minutes. The upper limit directly depends on the standards

⁶ a International Air Transport Association (IATA). Minimum Connect Time (MCT) User Guide. [Electronic resource]: https://www.iata.org/contentassets/638f0938b3dd451b872a1d8357755421/minimum-connecting-time-user-guide_version-1.1.pdf. Last accessed 24.04.2023.





Pic. 3. Obtained values of access-to-air-travel indicators for 2019 [the result of modelling of indicators of access to air travel for 2019 obtained by the author].

adopted by each airport and by airlines. For large, modern airports, the average transfer time is about 1–3 hours. However, with this approach, it is necessary to consider the departure time of each flight at each airport based on the regular schedule of passenger air transportation.

In addition to determining the waiting time, an important parameter for calculating the network coverage time indicator is the maximum allowable number of transfers k . Modern ticketing systems allow flights with no more than three transfers. However, considering the geographical features of the country, as well as uneven distribution of the population, it is proposed to raise the limit on the number of possible transfers to five.

The search for all T_{ij}^k is carried out by forming a set of all possible routes from X_i to other airports within the network. The set of all routes is obtained from the integration of direct routes with routes having one or more transfers. To obtain a route with a transfer, the Cartesian product of direct flights (many-to-many relationship) is used. After that, the following restrictions are imposed on the received routes:

- Correspondence of the airport of arrival to the airport of departure:

$$\{X_i \rightarrow X_j | X_i \rightarrow X_n, X_m \rightarrow X_j, n = m\}. \quad (6)$$

- Exclusion of cycles of one or more segments in the route:

$$\{X_i \rightarrow X_j | X_i \neq X_j\}. \quad (7)$$

Routes, flights along which do not meet the specified criteria, are not considered. Two airports for which no route matching the criteria was found are considered unreachable. To obtain routes with more than one transfer, an increase in the number of Cartesian products of direct flights is used, considering restrictions (6), (7) for each new shoulder. To the final set of all flights containing routes with $k=0,1,\dots,5$

transfers, a selection is applied that allows getting the best (minimum time to each X_j) flights for each X_i . Also, for each departure point, the population located in the gravitation area is put in correspondence with the potential number of passengers (PP_i). Next, the choice of the maximum time spent on transportation among the points of departure, providing a certain proportion of the population of Russia.

Unlike PP , TS or «ability» to reach the destination point does not have a well-defined range of values. First, because it cannot be considered in isolation from the geographical characteristics of the country and the peculiarities of the population distribution across its territory. The great-cycle distance between the two most remote airports (Simferopol and Mendeleevo (Kunashir Island)) is 8067 kilometers. With an average jet aircraft cruise speed of 800 km/h, the travel time between these two points, considering the actual route, will be at least 12 hours. This value sets a certain benchmark for the minimum theoretical value of TS for 100 % of the citizens of the Russian Federation.

Assessment of Access to Domestic Air Travel in 2019

To determine the range of realistic values for access indicators to domestic air travel, diagnostics of its already achieved parameters were carried out. ATS of 2019 was chosen as the basic transport system for calculating access indicators. The number of transfers available was limited to five. Flight waiting time is determined based on average annual frequencies ($T=12$). On the graph (Pic. 3), the author presents the result of calculations of the proposed access indicators: a graph of the dependence of PP on TS for the entire ATS.

The simulation results showed that, under given boundary conditions, there is no airport

that would be connected to all other airports in the country.

As can be seen from the graph, half of the country's population is eight hours apart from each other when travelling only by air (excluding the ground segment). Then there is a rapid increase in network connectiveness: with an increase in the time spent by a passenger on a journey by 20 % (up to 10 hours), the share of the population connected by air transport grows by more than 40 %. Then the potential to gather and transport passengers in a relatively compact and densely populated part of the country is exhausted, and the shortcomings of the existing ATS begin to manifest themselves in the most obvious way. Less than 3/4 of Russian citizens live within the previously stated benchmark of 12–15 hours. At the same time, more than 19 million people (13 %) live at more than 24 hours from the rest of the country.

Possibilities to increase access rate are concentrated in two directions. First, the shift of the distribution curve to the left, that is, a reduction in the time indicator of coverage, and upwards – an increase in the share of the population with a fixed time for provision of transport services.

Assessment of Access to Domestic Air Travel in 2035

Along with the assessment of the access to ATS in 2019, application of the proposed indicators of the access was considered for the target (simulated) route network for 2035. Modelling of the domestic air transportation network is based on the number of connections a particular airport has with other airports in the country. The main criterion for the quality of the total route network is to ensure the minimum travel time for the largest possible share of the country's population.

The target air transport system is proposed to be considered as a three-rank graph. Airports of the first rank form a backbone network and have connections with each other following the principle of «each with each». This segment includes 12 airports (Moscow, St. Petersburg, Yekaterinburg, Krasnodar, Novosibirsk, Omsk, Krasnoyarsk, Yakutsk, Samara, Rostov-on-Don, Irkutsk, Khabarovsk), which account for a larger passenger flow, as between the airports of the core network, as well as for transit flows from other segments of ATS.

The set of the second rank includes 133 airports connected with nodes of the 1st rank,

partially with each other and with airports of the 3rd rank. This group is a fundamentally important segment that ensures the speed of transit throughout the entire network.

The remaining points of the route network make up a group of the 3rd rank, which are connected only with airports of the second rank and do not have a direct connection with the route network of the first rank. The airports of this segment are «dead end» destinations and close (open) only the last (first) shoulder in the country's route network. This segment of the ATS is characterised by 247 airfields and landing sites. The ranking of airports and airfields was developed also in the form of the map, an exemplification is shown in Pic. 4.

The proposed reorganisation of the air transport network implies a transition to a «hub» system, that is, a reduction in operation of direct lines in favour of flights with transfers. This approach renounces to operation of non-stop lines with low traffic, at the same time new air links are being formed on routes where there is currently no direct air service, but there is enough potential passenger traffic for a daily flight.

The assessment of potential passenger traffic between cities is determined using multiple regression [16]. The list of influencing factors included the income rate and the population at the points of departure and arrival those factors being standard for such traffic generation models.

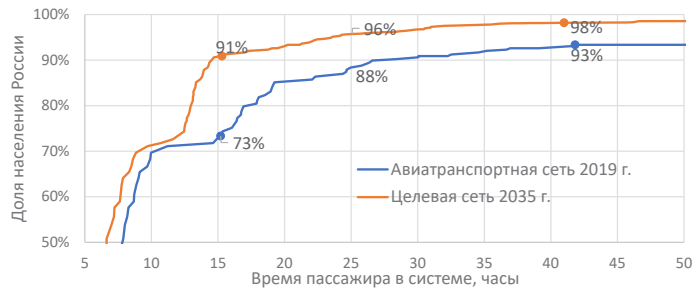
When modelling the network and redistributing flows, the following assumptions were taken:

- Operation of the route necessarily implies implementation of at least 300 flights per year.
- Operation of the route begins with an aircraft with the minimum available passenger capacity (19 seats for routes up to 800 km long).
- When the planned level of the aircraft's load factor is reached, the second flight starts to be operated instead of changing aircraft for increasing passenger capacity.
- Replacement of an aircraft for a larger one is carried out with an increase in passenger traffic to the level of full booking of two flights per day.
- Maximum calculated frequency on the route is no more than four daily flights.
- Routes from the 3rd rank airports terminate at the 2nd rank airports; to increase the commercial load, up to two intermediate landings are allowed.
- Connections between two airports of the 2nd rank located in the area of the same hub (up to





Pic. 4. The territorial location of the airports and airfields by rank [developed by the author].



Pic. 5. Actual and target values of indicators of access to air transport system of the Russian Federation [final result is obtained and performed by the author].

1000 km) are organised with a connection in the hub if the passenger flow on them is insufficient for a direct flight.

- Increase in the length of the route should not exceed 50 %.
- Connections between airports of the 2nd and the 1st ranks that existed in the first year of modelling are preserved for the entire period.

Because of changes in the structure of the air transport system, values of indicators of access to domestic air travel have been significantly increased (Pic. 5). Even though it was not possible to achieve full connectivity of the entire network, the number of Russian citizens who will not have access to all airports in the country without exception will decrease. If at present, with rather mild restrictions on the quality of the flight, 10 million people have no access to the entire airport network, then formation of a latitudinal chain of hubs and concentration of regional traffic in them will reduce this indicator by more than three times.

Even more significant improvements can be awaited in the segment of not extremely long and complex air links. For 50 % of the population, the travel time to each other will be reduced by almost 1 hour and 20 minutes, and for 91 %,

instead of today's 73 %, the time spent on board the aircraft and waiting at airports will not exceed 15 hours in total.

Based on the obtained results of the air transport system modelling, the target standards for access to domestic air travel can be set within the following limits:

$$7 \text{ hours} \leq (PP = 90\%) \leq 15 \text{ hours.}$$

Setting of the lower limit of *TS* is intended to stimulate the development of the air transport system in the western part of the country. Achieving this indicator will mean a reduction in travel time by almost 15 % for half of the country's population. Setting and meeting the upper *TS* target will result in 25 million more people than currently who will get access to transportation services within 15 hours.

BRIEF CONCLUSIONS

The paper presents a methodology for assessing the access to domestic air travel, based on two criteria: the potential number of passengers and the time of a passenger being in the system. Using the proposed approach, an assessment of access to air transport network of 2019 and 2035 was obtained. The results showed that in 2019 for 50 % of the population of the country, the

time for obtaining a transport service (passenger time being in the system) was within eight hours; for 75 % of the population the time increased to 16 hours, and for 90 % the upper limit was of 28 hours. To improve the quality of access to transport and to determine its target values, modelling of the target air transport system for 2035 was carried out. A three-rank network model was proposed. An assessment of the access to domestic air travel in the simulated network showed that for 50 % of the population, the time in the system can be reduced to 7 hours, and for 90 %, the time in the system will be cut to 15 hours, which improves the assessment of the network in 2019 almost by twice. The obtained values of indicators can be considered within the simulated model as target access standards.

REFERENCES

1. Bardal, A. B. Assessment of the quality of transport services for the population [*Otsenka kachestva transportnykh uslug dlya naseleniya*]. Collection of proceedings of the conference: *Sovremennye sotsialno-ekonomicheskie protsessy: problemy, tendentsii, perspektivy*, 2020, pp. 12–17. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45601033>. EDN: WAQCGI. Last accessed 15.02.2023.
2. Baron, A. Air transport efficiency and its measures. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 2010, Iss. 3 (205), pp. 119–132. [Electronic resource]: https://ilot.lukasiewicz.gov.pl/wp-content/uploads/2011/03/PIL_205.pdf. Last accessed 15.02.2023.
3. Gorbunov, V. P. The evolution of ideas about transport accessibility. *Byulleten transportnoi informatsii*, 2019, Iss. 8, pp. 10–14. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/thilwp>. Last accessed 15.02.2023.
4. Neretin, A. S. Transport situation and connectiveness of the territories of European Russia. Ph.D. (Geography) thesis. Moscow, Institute of Geography of RAS, 2018, 193 p.
5. Tarkhov, S. A. Changing the connectivity of the space of Russia (on the example of air passenger traffic) [*Izmenenie svyaznosti prostranstva Rossii (na primere aviapassazhirskogo soobscheniya)*]. Moscow-Smolensk, Institute of Geography of RAS, 2015, 154 p. ISBN 978-5-93520-084-8.
6. Dutov, A. V., Klochkov, V. V., Rozhdestvenskaya, S. M. Measurement and regulation of transport connectivity and quality of transport services for the country and its regions [*Izmerenie i normirovanie transportnoi svyazannosti i kachestva transportnogo obsluzhivaniya strany i ee regionov*]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya*, 2019, Iss. 14–2, pp. 43–48. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41381676> [paid access].
7. Gorshkova, I. V., Klochkov, V. V. Economic analysis of the prospects for development of air transport in sparsely populated regions of Russia [*Ekonomicheskiy analiz perspektiv razvitiya vozdušnogo transporta v*

malonaseleennykh regionakh Rossii]. *Problemy prognozirovaniya*, 2011, Iss. 6 (129), pp. 36–52. [Electronic resource]: <https://ideas.repec.org/a/scn/009162/14689402.html>. Last accessed 15.02.2023.

8. Van Nes, R. Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach, 2002, 304 p. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/profile/Rob-Nes/publication/35732146_Design_of_multimodal_transport_networks_a_hierarchical_approach/links/00b49531ec16c5283a000000/Design-of-multimodal-transport-networks-a-hierarchical-approach.pdf. Last accessed 15.02.2023.
9. Dubovik, V. O. Methods for assessing the access of the territory to transport [*Metody otsenki transportnoi dostupnosti territorii*]. *Regionalnie issledovaniya*, 2013, Iss. 4, pp. 11–18. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21118992>. Last accessed 15.02.2023.
10. Chistyakov, P. A., Fadeev, M. S., Dmitriev, M. E. [et al]. Integrated transport system [*Integrirovannaya transportnaya sistema*]. Centre for Strategic Research. Moscow, 2018, 278 p. [Electronic resource]: <https://www.csr.ru/uploads/2018/05/Report-Traffic-Infrastructure-2.0.pdf>. Last accessed 15.02.2023.
11. Kovaleva, E. N. Integral access to transport as an indicator of quality of transport service [*Integralnaya transportnaya dostupnost kak pokazatel kachestva transportnogo obsluzhivaniya*]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii*, 2011, Iss. 3, pp. 171–175. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17037866>. Last accessed 15.02.2023.
12. Egoshin, S. F., Smirnov, A. V. Access to air transport and transport discrimination of the population in the constituent entities of the Russian Federation [*Aviatransportnaya dostupnost i transportnaya diskriminatsiya naseleniya v subektakh Rossiiskoi Federatsii*]. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*, 2018, Vol. 21, Iss. 3, pp. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-3-78-90>.
13. Janic, M. Air transport system analysis and modelling. CRC Press, 2000, 318 p. ISBN 9780429176623.
14. Washington, S., Karlaftis, M. G., Mannering, F., Anastasopoulos, P. Statistical and econometric methods for transportation data analysis. 3rd Edition. Chapman and Hall/CRC, 2020, 496 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/m9780429244018>.
15. Sukharev, A. A., Vlasenko, A. O., Uryupin, I. V. Modelling and assessment of availability of local and regional air transportation for the population of the Russian Federation in the interests of forming requirements for advanced models of aircraft. In: Research and Development Management: the Role of Science in Achieving National Goals. Proceedings of the V scientific and practical conference (04.12.2019, Moscow). Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, National Research Centre «Zhukovsky Institute», gen. eds: Dutov, A. V., Novikov, D. A. Moscow, GarantInvest, Pero publ., 2020, pp. 188–196. [Electronic resource]: <https://www.nrczh.ru/upload/iblock/609/6095c04074c654ea0c41a068d399.pdf>. Last accessed 15.02.2023.
16. Richmond, S. B. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis. *J. Air L. & Com.*, 1955, Vol. 22, 434 p. [Electronic resource]: <https://scholar.smu.edu/jalc/vol22/iss4/4>. Last accessed 15.02.2023.

Information about the author:

Uryupin, Ilya V., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Scientist at the Federal Research Centre «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, uryupin93@yandex.ru.

Article received 10.03.2023, approved 17.05.2023, accepted 19.05.2023.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-7>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 222–232

Analysis of Competitiveness of Small Ports of the Azov-Black Sea Basin in Multimodal Transportation: Technological Aspects, Transportation Problem Optimisation



Maxim V. KOLESNIKOV



Victor A. BOGACHEV



Vyacheslav M. ZADOROZHNIY



Maxim V. BAKALOV

*Maxim V. Kolesnikov*¹, *Victor A. Bogachev*²,
*Vyacheslav M. Zadorozhnyi*³, *Maxim V. Bakalov*⁴

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia.

✉ ¹ kmv-d@list.ru.

✉ ² bogachev-va@yandex.ru.

✉ ³ zadorozhnyi91@mail.ru.

✉ ⁴ Maxim_bmw@mail.ru.

ABSTRACT

A new approach is proposed to the study of functioning of the connecting and transforming link of the multimodal transport and logistics chain, implemented by railway cargo transportation. The methodological basis of the research is classical principles of egalitarianism in the theory of welfare, which allow, based on assessment of the transport and technological infrastructure of the network segment and tariff rates, to build mathematical models that are economically justified, customer-oriented and in demand in management of cargo transportation processes.

An algorithm for solving a multi-criteria and multi-extremal problem of integer linear programming with a set of cost objective

functions has been developed in the medium of the analytical computing system. The computational experiment is used as a guiding heuristic tool in finding the optimal level of organisation and economic efficiency of the cargo transportation process. Optimal combinations of distributions of the number of departure routes per loading stations and related plans of transportation to the reloading stations were found with the help of the Pareto criterion. The obtained values of cost indicators provide the participants of the transportation process with the opportunity to choose competitive options in transportation schemes using small port transshipment stations of the Azov-Black Sea basin.

Keywords: multimodal cargo transportation, cost indicators, optimisation, Pareto criterion, «steps» of the «optimisation ladder», «fields of influence» of loading stations, port transshipment stations.

For citation: Kolesnikov, M. V., Bogachev, V. A., Zadorozhnyi, V. M., Bakalov, M. V. Analysis of Competitiveness of Small Ports of the Azov-Black Sea Basin in Multimodal Transportation: Technological Aspects, Transportation Problem Optimisation. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 222–232. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-7>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

When studying the functioning of railway transport, which is a connecting and transforming link in the logistics chain of multimodal cargo transportation, it is relevant and expedient to develop existing and new approaches to optimise transport and logistics processes to increase their efficiency and save resources.

In general, optimisation in transportation problems is the process of finding the best solution for transportation of goods or passengers [1].

One of the methods for solving optimisation problems related to railway transport is optimisation of train routes and schedules [2–5]. This may include rescheduling trains to increase the number of cargo and passenger trains during peak hours, as well as more even load distribution. These measures make it possible to reduce the downtime of trains at stations and reduce the cost of their operation.

Another method for solving these problems is optimisation of the weight characteristics of trains [6].

The integration of information technologies and digital systems makes it possible to increase the efficiency of railway transport, reduce the cost of its operation and maintenance, and improve the quality of service provided to freight customers [7]. Environmental aspects of cargo transportation should be also considered [8].

Based on a review of works devoted to the analysis of the grain transportation market, we note that considerable attention is paid to the analysis of infrastructure and logistics, including the problems of access to the transport infrastructure, its efficiency and competitiveness [9].

Also, it is possible to find studies on certain aspects of the grain transportation market. For example, some studies analyse the impact of climate change on grain transportation [10], including changing transport routes and increasing grain transportation costs. Other studies focus on the analysis of changes in grain transportation tariffs, including the impact of changes in supply and demand on prices [11].

In general, forecasting of tariffs for operation of cargo wagons is an important tool used by railway companies and their customers in managing transportation costs and effectively planning their activities [12; 13].

Several studies analyse the technological aspects of grain transportation, including

development of new technologies and innovative solutions to improve transportation efficiency and reduce costs [14; 15].

The objective of the research is to develop new approaches to optimisation of transportation and logistics processes to increase their efficiency and save resources.

The methodology of the research is based on classical principles of egalitarianism in the theory of welfare, which allow, based on assessment of the transport and technological infrastructure of the rail network segment and tariff rates, to build mathematical models that are economically justified, customer-oriented and in demand regarding management of cargo transportation processes.

RESULTS

1. Analysis of the Grain Transportation Market

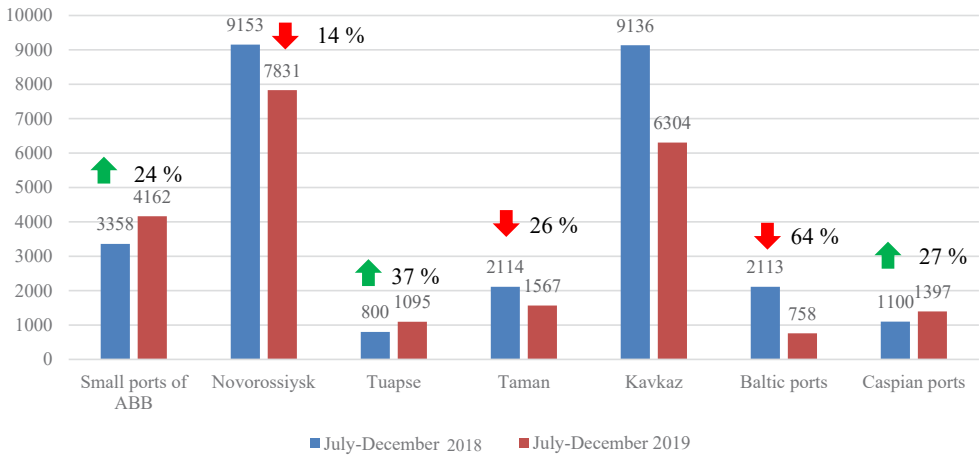
The grain transportation market plays a very significant role in the global economy. In recent years, grain exports from the Russian Federation have been characterised by significant growth (albeit subject to fluctuations). Almost 90 % of grain passes through seaports and almost 81 % – through the ports of the Azov-Black Sea basin (ABB). It should be noted that in July–December 2019, shipments in the ports of the Baltic Sea, as well as in such ABB ports as Kavkaz and Taman, significantly decreased. At the same time, there was an increase in shipments in the port of Tuapse (+37 %), in small ports of ABB (+24 %), as well as in the ports of the Caspian Sea (+27 %). Data on the main directions of Russian grain exports are shown in Pic.1.

In the transport system that provides multimodal transportation of grain in the south of Russia, we will single out the following key components: deep-water ports of Novorossiysk, Taman and Tuapse (allowing to receive ships of Handysize, Suezmax, Panamax standard sizes); small ports of the Sea of Azov; river ports of the Volga and Don.

2. Statement of the Problem and Mathematical Model of the Transforming Link of the Logistics System

The general methodology of the research is based on egalitarian principles of welfare theory [16]. We approach the solution of transportation and logistics problems from the standpoint of





Pic. 1. Main directions of export of grain cargoes. Source: data of Rusagrotrans [rusagrotrans.ru/upload/Рычагпомпакс ГЗА 2020.pdf. Last accessed: 15.01.2023].

one of the basic rules of egalitarianism which is the principle of unanimity in relation to all considered participants in the transportation process (following the terminology of [16], we call them agents). For multimodal transportation systems, coordination of actions of cooperating agents, as well as the level of mutual business trust, are of particular importance. Therefore, in each link of the logistics system, implementation of the interests of any agent should not occur through direct or indirect infringement on the interests of other agents.

The developed methodology for optimised modelling of the process of cargo transportation within the segment of transport network is not directly related to game theory (as is known, this theory of mathematical models is devoted to finding optimal solutions in conflict conditions [17]). We do not consider the strategies of players, and their relationships do not seem to be antagonistic, since the tool for optimising distribution of cargo flows, one way or another, is the Pareto criterion.

Let's move on to the statement of the problem, which considers the key transformative link of the multimodal logistics system, represented by railway cargo transportation. There are m loading stations and n port reloading stations. At each loading station, departure trains are assembled with some cargo. At the same time, the price of cargo at the stations is different. The transshipment stations are such that n_1 of them are deep water ports and n_2 are small ports ($n_1 + n_2 = n$). Regarding loading stations, it will be necessary to perform mathematical and organisational constructs.

Let B be a given positive integer. Let's introduce a set D , whose elements are all sorts of ordered sets $(a_i)_{i=1}^m$ where a_i are non-negative integers satisfying the condition:

$$\sum_{i=1}^m a_i = B. \quad (1)$$

The set D is a subset of the hyperplane defined in the space R^m by the equation (1), whose points have non-negative integer coordinates. From the point of view of combinatorics, each element of the set D can be represented as an arrangement of B indistinguishable objects in m cells. By virtue of the well-known formula [18], we obtain that the number of elements D is equal to:

$$C_{B+m-1}^{m-1} = \frac{(B+m-1)!}{B!(m-1)!}. \quad (2)$$

It can be seen from the right side of the equation (2) how quickly the values C_{B+m-1}^{m-1} increase with increasing values of each of the parameters m and B .

Let us return to the link of the logistics chain represented by railway cargo transportation, assuming that the next (also transformative link) is implemented by sea transport. In this situation, the ordered sets $(a_i)_{i=1}^m \in D$ introduced above represent all possible options for distributing the number a_i of departing trains over m loading stations. These routes are sent to the address of a single or any of the transshipment stations and in total ensure the formation of a complete ship lot with a given volume B .

Further, we will consider the set D , first, in connection with the set of n_2 transshipment

stations related to small ports. We introduce two cost indicators that characterise the process of cargo transportation directly or indirectly and allow us to assess the corresponding economic feasibility.

Let p_i be the cost of the cargo that fills the train sent from the i -th loading station $i = 1, 2, \dots, m$. For each distribution $(a_i)_{i=1}^m \in D$ of the number of trains over m loading stations, we put:

$$P = \sum_{i=1}^m p_i a_i. \quad (3)$$

The values of the objective function P represent the cost of the entire cargo, which, when the dispatched trains are distributed $(a_i)_{i=1}^m$ among the loading stations, will be transported to the address of some station (or any stations) of transshipment. The introduction of the indicator P is due to the fact that the price of cargo located at different loading stations is different. The objective function (3) represents an «external» (in relation to the business process of cargo transportation) commercial indicator, through which the logistical content of a transportation-type task is developed, first, in relation to the client.

Let us now introduce a set of indicators guided by some considerations and designed to single out one or another of transshipment stations under consideration. These indicators are analogues of the objective function in the classical transportation problem and have the form:

$$C_j = \sum_{i=1}^m c_{ij} a_i. \quad (4)$$

Here c_{ij} is the cost of transportation of one departing train in the section between the i -th loading station ($i = 1, 2, \dots, m$) and the j -th reloading station in a multimodal transportation and logistics chain ($j = 1, 2, \dots, n$).

The task of this research is to build (within the specified indicators) an optimisation model of the transforming link of the logistics system, as well as to develop an algorithm for solving the corresponding multi-purpose and multi-extremal problem. The model has a complex character and is represented by interconnected «external» and «internal» parts. The «external» part of the model corresponds to the optimisation problem of finding distributions $(a_i)_{i=1}^m$ of departing trains over loading stations, at which objective function (3) reaches a minimum. The «internal» part of the model corresponds to an

optimisation problem (derived from the previous one), in which for each distribution $(a_i)_{i=1}^m$ (varied in the «external» part of the model) transportation plans are found that provide the minimum value of the total cost of transportation (with objective functions (4)) to n_2 transshipment stations (let us recall that the transshipment stations considered in the aggregate n_2 constitute a multimodal transport hub with small ports). Multi-objective optimisation is based on the Pareto criterion, through various forms of which the interests of the agents under consideration are considered.

In accordance with the above, we introduce transportation plans (x_{ij}) , where x_{ij} are the numbers of trains sent from the i -th loading station to the address of the j -th reloading station, which must satisfy the equalities:

$$\sum_{j=1}^{n_2} x_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

Let us recall that the numbers a_i satisfy the condition (1).

3. The Relevance of the Project of Application Project of the Developed Methodology and Project's Features

The developed methodology has for an object of application the transport and technological system (TTS) of the segment of the rail network of the North Caucasian Railway (NCR), adjacent to deep-water ports on the Black Sea coast and small ports in the Taganrog Bay. Due to the intensive exploitation of railway and road approaches to deep-water ports, it seems very relevant to develop alternative options for transformative links of logistics chains, which under the conditions under consideration may turn out to be competitive.

For the numerical implementation of the optimisation model constructed in the article, we will proceed from the following assumptions:

- Grain loading stations are Timashevskaya (1), Apollonskaya (2), Zernograd (3), Salsk (4), Tatsinskaya (5) and Remontnaya (6); port stations are Taman (1), Novorossiysk (2), Tuapse (3), Eisk (4), Taganrog (5) and Azov (6).
- A block train is formed on average of 50 cars with a carrying capacity of 64 tons.
- Cargo ships (of the Panamax type) with a deadweight of up to 80000 tons can call at deep-water ports year-round.

Thus, exactly $B = 25$ trains are required to fully load one ship lot.



Table 1

Cost characteristics of grain cargo traffic [performed by the authors]

No.	Loading station	Grain price at loading stations, mln rub./route	Cost of transportation, mln rub./train					
			Taman 1	Novorossysk 2	Tuapse 3	Eisk 4	Taganrog 5	Azov 6
1	Timashevskaya 1	46,20	1,39	1,28	1,39	1,28	1,60	1,44
2	Apollonskaya 2	43,84	2,45	2,37	2,04	2,66	2,45	2,37
3	Zernograd 3	45,12	2,05	1,98	2,12	1,44	1,23	1,05
4	Salsk 4	49,60	2,05	1,89	1,97	1,74	1,55	1,39
5	Tatsinskaya 5	43,84	2,57	2,45	2,56	1,89	1,74	1,60
6	Remontnaya 6	45,12	2,45	2,37	2,36	2,12	1,89	1,82

It is to note that the allowable deadweight policy may change over time and depending on many factors (port depth and condition, types of ships, government regulations and regulatory guidelines). Considering the location of the port of Azov, the corresponding railway infrastructure, as well as the rationality of technology of train submission for unloading, we assume that in the situation under consideration, no more than four trains can go to the specified address (from all the indicated loading stations in the aggregate). This constraint corresponds to the fact that sea vessels with a deadweight of up to seven thousand tons can call at the port of Azov (thus, one vessel is practically filled with cargo transported by two trains).

Numerical data that allow performing the corresponding calculations of the optimisation model of cargo transportation are given in Table 1.

4. Preliminary Results

For the software implementation of the optimisation algorithm developed in the article for the logistic modelling of the process of cargo transportation and execution of computational procedures, we turn to the *Maxima (Free Ware)* environment. In this section, we present the results of the corresponding mathematical experiments, which are of a trial nature. Based on considerations of balanced distribution of the number of trains by loading stations, and also taking into account the volume of the ship lot (see Section 3), hereinafter we assume that no more than ten trains with grain can be formed at each loading station.

As already mentioned, the object of application of the developed methodology is the TTS of the North Caucasus Railway range, which includes the port stations of Eisk, Taganrog and

Azov (considered in this study in the aggregate).

Let's enter the total cost indicator:

$$S=P+C, \quad (6)$$

where $C=C_4+C_5+C_6$ (see (4)).

Let's start by minimising the values of the indicator S , while also observing the changes that occur in other indicators: P , C_4 , C_5 , C_6 , and C . Table 2 shows eight distributions of the number of trains by loading stations, the corresponding transportation plans to the indicated three transshipment stations, as well as the values of the indicators under consideration. We stopped the computation process after the 40-th iteration, guided by several considerations. The main reason for stopping the calculations is positive and lies in the fact that the minimum value of the cost P of the entire transported grain has been reached, which is equal to 1102,4 mln rubles (such a conclusion can be drawn directly from the numerical data contained in Table 1). With constraints imposed on the volume of grain exported from loading stations, the stations that provide the indicated value are Apollonskaya, Tatsinskaya and Zernograd (note that instead of Zernograd station, Remontnaya station can act as the departure station as well). So, (see No. 40 in Table 2), there are ten trains each at Apollonskaya and Tatsinskaya stations, and five trains at Zernograd station.

For the 40-th iteration, the value of the total cost indicator S turned out to be 1149,73 mln rubles. In the process of minimising this indicator, the cost of transportation C increased by more than 9 % (note that the corresponding changes were not monotonous) and reached a value of 47,73 mln rubles. The obtained value of the indicator S is of interest, first, to the client. The value of the indicator C (both in terms of increasing and decreasing the cost of transportation) is also of interest to the owner of

Table 2

**Distribution of trains, transportation plans and value of indicators P , C_i , C_s , C_o , C and S
[performed by the authors]**

No.	Port/ Loading station ¹	Grid of connections of train flows, pcs.						P	C_i	C	S
		Tm1	Ap 2	Zr 3	Sl 4	Tc 5	Rm 6				
1	Total	0	0	0	5	10	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	43,41	1181,01
	Tg 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Az 6	0	0	0	4	0	0		5,56		
2	Total	0	0	1	4	10	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1133,12	0	43,07	1176,19
	Tg 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Az 6	0	0	1	3	0	0		5,22		
3	Total	0	0	2	3	10	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1128,64	0	42,73	1171,37
	Tg 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Az 6	0	0	2	2	0	0		4,88		
...
15	Total	0	3	9	0	10	4				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1112,64	0	40,21	1152,85
	Tg 5	0	2	5	0	10	4		36,01		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
16	Total	0	2	10	0	10	3				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1112,64	0	39,75	1152,39
	Tg 5	0	0	8	0	10	3		32,91		
	Az 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
...
38	Total	0	8	7	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1104,96	0	44,89	1149,85
	Tg 5	0	8	3	0	10	0		40,69		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
39	Total	0	9	4	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1103,68	0	46,11	1149,79
	Tg 5	0	9	0	0	10	0		41,91		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
40	Total	0	10	5	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,33	1149,73
	Tg 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

the infrastructure and the carrier (for example, based on considerations of the competitiveness of railway transport in relation to road transport). Note that in all iterations, Eisk transshipment station turned out to be devoid of trains arriving at it, which also allows for different interpretations in relation to agents.

To obtain preliminary results, we will also consider the process of minimising the values of the cost indicator C , assuming that the values of the indicator P do not change and remain equal to the minimum value of 1102,4 (million rubles). (Note that it was possible to minimise the values of the exponent S). The corresponding results are shown in Table 3.

The same values were obtained as in the previous experiment (compare the last rows in Tables 2 and 3). Thus, for agents whose interests are primarily focused on minimising the total cost indicator S , the given results (within the limits set) seem to be unimprovable.

5. Auxiliary Results

Another reason for stopping the process of obtaining preliminary results is the large number of calculations performed when solving the optimisation problems under consideration. It

¹ Here and after the stations will be indicated by abridged names and numbers according to the Table 1 and the text. – *Ed. note*



Table 3

Distribution of the number of trains, transportation plans and values of indicators
P, C₄, C₅, C₆, C and S [performed by the authors]

No.	Port/ Loading station	Grid of connections of train flows, pcs						P	C _i	C	S
		Tm1	Ap 2	3p 3	Cl 4	Tll 5	Pm 6				
1	Total	0	10	0	0	10	5				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,35	1153,75
	Tg 5	0	10	0	0	10	5		51,35		
	Az 6	0	0	0	0	0	0		0		
2	Total	0	10	0	0	10	5				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,28	1153,68
	Tg 5	0	10	0	0	10	4		49,46		
	Az 6	0	0	0	0	0	1		1,82		
3	Total	0	10	0	0	10	5				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,21	1153,61
	Tg 5	0	10	0	0	10	3		47,57		
	Az 6	0	0	0	0	0	2		3,64		

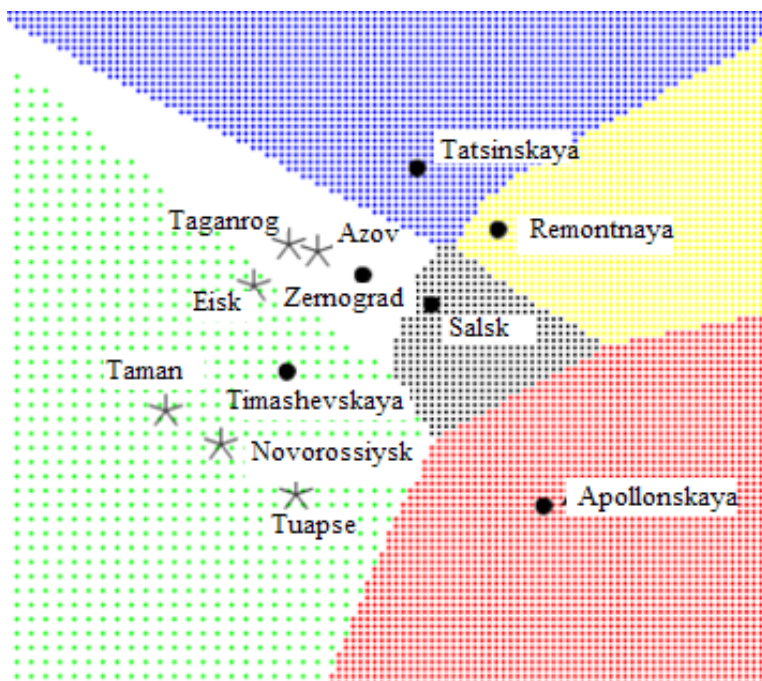
19	Total	0	10	1	0	10	4				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	50,09	1152,49
	Tg 5	0	10	0	0	7	4		44,24		
	Az 6	0	0	1	0	3	0		5,85		
20	Total	0	10	2	0	10	3				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	39,75	1152,43
	Tg 5	0	10	2	0	10	3				
	Az 6	0	0	0	0	0	0				

60	Total	0	10	5	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,41	1149,81
	Tg 5	0	10	3	0	8	0		42,11		
	Az 6	0	0	2	0	2	0		5,3		
61	Total	0	10	5	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,37	1149,77
	Tg 5	0	10	2	0	9	0		42,62		
	Az 6	0	0	3	0	1	0		4,75		
62	Total	0	10	5	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,33	1149,73
	Tg 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

follows from formula (5) that the number of admissible transportation plans (x_{ij}) in the considered project is estimated from below by the number:

$$C_{B+m-1}^{m-1} \cdot C_{B+n_2-1}^{n_2-1} = \frac{30! \cdot 27!}{(25!)^2 \cdot 5! \cdot 2!} = 50019606. \tag{7}$$

To find additional and reasonable constraints on the sets of admissible transportation plans, we turn to the *geometric Euclidean model (GEM)* developed earlier by the authors for the territorial oligopolistic cargo market created by loading stations. The method of economic-geographical delimitation of the areas of influence of loading



Pic. 2. A picture of the territorial grain transportation market [performed by the authors].

stations, which makes it possible to construct this model, is described in detail in [19–21]. Only the corresponding results are presented here, which were obtained based on (found using the least squares method) expressions for the dependence of the cost c of cargo transportation for the loading stations under consideration (see Table 4).

In this case, the lines delimiting the «fields of influence» of loading stations in duopolistic situations are the branches of hyperbolas (parts of these branches are depicted by the *Maxima* analytical computing system in Pic. 2). The «area of influence» of Timashevskaya station (1) included the port stations Taman, Novorossiysk, Tuapse and Eisk, and the «area of influence» of Zernograd station included the stations of Taganrog and Azov. Thus, none of the considered port stations fell into the «field of influence» of other four loading stations. Since the costs of start-end operations at loading stations are pairwise different (see Table 4), these results do not follow from simple geographical considerations.

Note that the use of methods of various mathematical nature in applied research makes it possible to increase the degree of reliability of the results obtained. In this case, it is often possible to significantly reduce the number of computational procedures performed when

Table 4
Expressions of dependence of transportation cost [performed by the authors]

1	Timashevskaya	$c = 0,0021 + 0,819$
2	Apollonskaya	$c = 0,0021 + 0,912$
3	Zernograd	$c = 0,0021 + 0,830$
4	Salsk	$c = 0,0021 + 0,892$
5	Tatsinskaya	$c = 0,0021 + 0,833$
6	Remontnaya	$c = 0,0021 + 0,959$

solving the corresponding optimisation problems. Based on the *GEM* of the territorial cargo market, we impose the following constraints on the set of admissible transportation plans. We will assume that no more than three trains can be sent to Eisk port station from all loading stations, except for Timashevskaya (1). In addition, more than three routes to Taganrog station cannot be sent from the specified loading station.

6. Discussion

Let's move on to the multi-criteria optimisation of the process of cargo transportation to the transshipment stations Eisk, Taganrog and Azov, which are considered together. Optimisation will be carried out on the basis of the egalitarian approach in welfare theory [16] within the framework of the cost indicators P and C introduced in Section 2. The tool that implements the unanimity principle is the Pareto criterion.



Table 5

Distribution of the number of routes, transportation plans and values of indicators P , C , C_i , C_6 , C and S [performed by the authors]

No.	Port/ Loading station	Grid of connections of train flows, pcs						P	C_i	C	S
		Tm1	Ap2	Zr3	Sl4	Tc5	Rm6				
1	Total	0	10	0	5	0	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,83	1188,43
	Tg 5	0	6	0	5	0	10		41,35		
	Az 6	0	4	0	0	0	0		9,48		
2	Total	0	10	0	5	0	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,75	1188,35
	Tg 5	0	7	0	4	0	10		42,25		
	Az 6	0	3	0	1	0	0		8,5		
3	Total	0	10	0	5	0	10				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,67	1188,27
	Tg 5	0	8	0	3	0	10		43,15		
	Az 6	0	2	0	2	0	0		7,52		
...
52	Total	0	9	9	0	1	6				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1115,2	0	45,48	1160,68
	Tg 5	0	9	5	0	1	6		41,28		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
53	Total	0	10	10	0	1	4				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1113,92	0	45,48	1159,4
	Tg 5	0	9	7	0	1	4		39,96		
	Az 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
...
94	Total	0	5	10	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,43	1150,23
	Tg 5	0	3	8	0	10	0		34,59		
	Az 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
95	Total	0	5	10	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,33	1150,13
	Tg 5	0	4	7	0	10	0		35,81		
	Az 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
96	Total	0	5	10	0	10	0				
	Ek 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,23	1150,03
	Tg 5	0	5	6	0	10	0		37,03		
	Az 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

To each distribution of the number of trains $(a_i)_{i=1}^m \in D$ over m loading stations and to each related plan of transportation (x_{ij}) to the transshipment stations under consideration, we assign a vector $\{P, C\}$, called the utility vector. An optimal combination of distribution of the number of trains and a transportation plan is such a combination of $(a_i^*)_{i=1}^m$ and (x_{ij}^*) with the utility vector $\{P^*, C^*\}$, that there is no combination of $(a_i)_{i=1}^m$ and (x_{ij}) , the coordinates

of the utility vector $\{P, C\}$ that satisfy the condition $(P < P^*, C \leq C^*)$ or a condition $(P \leq P^*$ and $C < C^*)$.

From the sentential link expression:

$$(P < P^* \wedge C \leq C^*) \vee (P \leq P^* \wedge C < C^*), \quad (8)$$

it follows that in the process of optimisation there is no loss of utility for any of the agents interested in minimising the indicators P and C .

Table 5 shows eight sets of numerical data from 96 «steps» found by *Maxima* and making up the corresponding «optimisation ladder».

Table 6

**Distribution of the number of trains and values of indicators P , C_i and $P+C_i$
[performed by the authors]**

No.	Number of trains formed at loading stations						P	C_i	S
	Tm1	Ap2	Zr3	Sl4	Tc5	Rm6			
1	0	0	0	5	10	10	1137,6	60,45	1198,05
2	0	0	1	4	10	10	1133,12	60,45	1193,57
3	0	0	2	3	10	10	1125,64	60,45	1189,09
...
37	2	10	10	0	2	1	1114,8	55,37	1170,17
38	3	6	9	0	7	0	1114,6	55,31	1169,91
...
48	6	10	3	0	6	0	1114,0	54,41	1168,41
49	7	9	1	0	8	0	1113,8	54,39	1168,19
50	7	10	1	0	7	0	1113,8	54,27	1168,07

For the optimal combination of distribution of the number of trains by loading stations and the transportation plan, it turns out (see No. 96 in Table 5) that five trains should be formed at Apollonskaya station, and ten trains at each Zernograd and Tatsinskaya stations. At the same time, the value of the indicator S turns out to be equal to 1150,03 mln rubles, that is, it practically coincides with the value of 1149,73 mln rubles obtained in Section 4. However, the value of indicator C turns out to be 41,23 mln rubles, that is, 6,1 mln rubles less than in the previous case (the difference is almost 13 %).

So, in the optimal combination, from the point of view of the client, the indicators are not inferior to the previous ones, but in relation to the carrier, the owner of the transport infrastructure and the operator company, they may turn out to be more preferable.

For comparison, let's consider the results of optimisation of cargo transportation performed to Taman deep-sea transshipment station. Here we use the Pareto criterion with indicators P and C_i . Table 6 shows eight sets of numerical data from 50 «steps» that make up the corresponding «optimisation ladder».

For the optimal distribution of the number of trains by loading stations (note that it differs significantly from the distributions obtained for the aggregate of small ports), the following values were obtained: $P=1113,8$ mln rubles, $C_i=54,27$ mln rubles and $S=P+C_i=1168,07$ mln rubles. In this case, the cost of transportation is 13,04 mln rubles more than for transportation to small ports (the difference is almost 32 %).

CONCLUSION

An approach based on egalitarian principles of the theory of welfare has been developed in studying the functioning of the key connecting and transforming link in the logistics system, which is cargo transportation by rail. The mathematical model of the transportation process, considered within the framework of a set of cost indicators, is a multicriteria and multiextremal problem of integer linear programming. In view of the special importance for multimodal cargo transportation systems of coordinating the actions of cooperating agents and the level of their business trust, implementation of the interests of any agent should not occur by infringing on the interests of others.

Pareto-optimal combinations of distributions of the number of trains by loading stations and related plans of cargo transportation to the reloading stations are found. The corresponding values of cost indicators provide agents with the opportunity to choose alternative options in transportation schemes in terms of competitiveness of small near-port transshipment stations in relation to deep-sea stations.

The program implementation of the optimisation algorithm for the functioning of the considered link of the logistics system is made in the environment of the analytical computing system. Appeal to computational experiments creates opportunities for purposeful operation with the values of objective functions and constraints in a transportation-type problem to identify the optimal level of organisation and economic efficiency of the transportation process.



REFERENCES

1. Zak, Yu. A. Mathematical models and algorithms for constructing acceptable and optimal routes for movement and delivery of goods [Matematicheskie modeli i algoritmy postroeniya dopustimyykh i optimalnykh marshrutov dvizheniya i dostavki gruzov]. *Control sciences*, 2016, Iss. 5, pp. 57–70. [Electronic resource]: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=pu&paperid=993&option_lang=rus. Last accessed 13.01.2023.
2. Borodin, A. F., Verbov, D. M., Rubtsov, D. V., Novikov, P. O. Automated system for organising car flows: modern theory and practice [Avtomatizirovannaya sistema organizatsii vagonopotovok: sovremennye teoriya i praktika]. *Zheleznodorozhniy transport*, 2021, Iss. 11, pp. 4–17. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47186444> [paid access].
3. Baushev, A. N., Saffronov, V. S., Osminin, A. T., Sadchikova, V. A. Algorithms for optimising the process of coordinating applications for transportation of goods through the network of Russian railways [Algoritmy optimizatsii protsessa soglasovaniya zayavok na perevozki gruzov po seti rossiiskikh zheleznikh dorog]. *Vestnik transporta Povolzh'ya*, 2022, Iss. 5 (95), pp. 52–66. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49856109>. Last accessed 13.01.2023.
4. Osminin, A. T. On development of an intelligent system for managing the transportation process [O razrabotke intellektualnoi sistemy upravleniya perevozochnym protsessom]. *Zheleznodorozhniy transport*, 2021, Iss. 3, pp. 17–27. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44819081> [paid access].
5. Kuzhel, A. L., Osminin, A. T., Osminin, L. A. Development of the theory and practice of developing a train schedule [Razvitie teorii i praktiki razrabotki grafika dvizheniya poezdov]. *Zheleznodorozhniy transport*, 2012, Iss. 3, pp. 6–13. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17723039>. [paid access].
6. Koksharov, Yu. A. Efficiency of optimising the standard of a cargo train [Effektivnost optimizatsii normy sostava gruzovogo poezda]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta puti soobshcheniya*, 2005, Iss. 1, pp. 7–11. [Electronic resource]: https://izvestiagups.org/assets/pdf/01_2005.pdf [full text of the issue]. Last accessed 13.01.2023.
7. Sharov, V. A., Tleukhanov, A. A. Commercially Focused Dynamic Priorities in the Organization of the Transit of Cargo Trains. *World of Transport and Transportation*, 2019, Iss. 4 (83), pp. 208–217. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-208-217>.
8. Osintsev, N. A., Rakhmangulov, A. N. Assessment of logistics flows in green supply chains by DEMATEL method. *Nauka i tekhnika transporta*, 2021, Iss. 4, pp. 81–89. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_3_162.
9. Sevostyanov, A. L. Problems of grain export transport infrastructure development. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, Iss. 3, pp. 162–167. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47403407>. Last accessed 13.01.2023.
10. Svetlov, N. M. The impact of global warming on agricultural commodity flows in European Russia [Vliyaniye globalnogo potepeniya na selskokhozyaistvennye tovarnye potoki Evropeiskoi Rossii]. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal*, 2018, Iss. 3, pp. 214–227. DOI: 10.24411/2413-046X-2018-13010.
11. Cherepanov, I. O. Looking for loading resources [Izyskivaya pogruzochnye resursy]. *Zheleznodorozhniy transport*, 2018, Iss. 9, pp. 48–49. [Electronic resource]: <https://rucont.ru/efd/784498> [paid access].
12. Kurenkov, P. V., Khusainov, F. I. Russian railways infrastructure and car fleet regulation [Infrastruktura zheleznikh dorog Rossii i regulirovaniye vagonnykh parkov]. *Ekonomika zheleznikh dorog*, 2013, Iss. 9, pp. 35–48. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211142>. Last accessed 13.01.2023.
13. Khusainov, F. I. Economic problems of car fleet management [Ekonomicheskie problemy upravleniya vagonnymi parkami]. *Ekonomika zheleznikh dorog*, 2010, Iss. 11, pp. 63–67. [Electronic resource]: https://www.hse.ru/data/2014/02/19/1330667500/14_economicheskoye2010.pdf. Last accessed 13.01.2023.
14. Kuzhel, A. L. An integrated approach is needed [Neobkhodim kompleksniy podkhod]. *Zheleznodorozhniy transport*, 2018, Iss. 9, pp. 41–43. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36283660> [paid access].
15. Tretyakov, G. M., Denisov, V. V., Kononov, I. I. Improving the efficiency of grain cargo transportation by rail [Povysheniye effektivnosti perevozki zernovykh gruzov zheleznodorozhnym transportom]. *Nauka i obrazovanie transportu*, 2013, Vol. 1, Iss. 1, pp. 80–83. [Electronic resource]: <https://csc-knu.github.io/tpr/books/mulen-1991.pdf>. Last accessed 13.01.2023.
16. Moulin, H. Axioms of Cooperative Decision Making [Transl. from English]. Moscow, Mir publ., 1991, 464 p. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21808892>. Last accessed 13.01.2023.
17. Vinogradov, I. M. Mathematical Encyclopaedia: Vol.2 [Matematicheskaya entsiklopediya: T.2]. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya, 1979, pp. 79–80.
18. Prokhorov, Yu. V., Rozanov, Yu. A. Probability Theory: Basic Concepts. Limit theorems. Random processes [Teoriya veroyatnostei: Osnovnye ponyatiya. Predelnye teoremy. Sluchainie protsessy]. Moscow, Nauka publ., 1967, 495 p.
19. Chislov, O. N., Zadorozhniy, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Bakalov, M. V. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems*, 2021, Vol. 16, Iss. 2, pp. 153–165. DOI: 10.21307/tp-2021-031.
20. Chislov, O., Zadorozhniy, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Egorova, I. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 208, pp. 197–210. DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_13.
21. Zadorozhniy, V. M., Malozemov, V. N., Bogachev, V. A. Economic and geographic method in modeling oil products cargo flows on the North-Caucasian railway region. *Vestnik RGUPS*, 2020, Iss. 2, pp. 103–112. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43040817>. Last accessed 13.01.2023. ●

Information about the authors:

Kolesnikov, Maxim V., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Economics and Management of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, kmv-d@list.ru.

Bogachev, Victor A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, bogachev-va@yandex.ru.

Zadorozhniy, Vyacheslav M., Ph.D. (Eng), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Stations and Cargo Operations of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, adorozniy91@mail.ru.

Bakalov, Maxim V., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Operations Management of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, Maxim_bmw@mail.ru.

Article received 27.04.2023, approved 02.06.2023, accepted 05.06.2023.



Typification of Projects for Development of High-Speed Rail



Sergey P. VAKULENKO



Dmitry Yu. ROMENSKY



Kirill A. KALININ

*Sergey P. Vakulenko*¹, *Dmitry Yu. Romensky*², *Kirill A. Kalinin*³

^{1, 2, 3} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

✉ ¹ post-iuit@bk.ru.

✉ ² dimeromy@yandex.ru.

✉ ³ kalinin.k.a@mail.ru.

¹ SPIN-code: 1039-5188, AuthorID: 284529 (Russian science citation index)

² ORCID 0000-0002-3693-5508, Web of Science Researcher ID AAS-8681-2021; Author ID 748301,

SPIN-код: 6636-1692 (Russian science citation index)

ABSTRACT

The emerging demand for improving consumer parameters of rail passenger transport leads to the need to build a dedicated railway infrastructure for passenger trains with speeds exceeding in some sections 250 km/h. The high capital intensity of dedicated infrastructure development projects imposes significant restrictions on their scope and financial feasibility. The geographically determined location of urban agglomerations in European and Asian countries has led to formation of many approaches to the routing of lines for high-speed passenger transportation.

The projects for development of dedicated high-speed railways being developed in various countries differ in their technical, technological, and operational characteristics. The use of different approaches has led to different efficiency of the passenger traffic, expressed in the demand of passengers for transportation.

A structural analysis of existing high-speed transportation projects allowed revealing general patterns of their development.

By the number of operational tasks arising with regard to movement of trains, the phases of traffic development were divided into linear, tree-like and network stages. Thus, when moving from the linear structure of a high-speed rail, an additional problem arises of trains passing from the main track to the secondary one. The transition to the network stage can result in emergence of parallel passages rail tracks between urban agglomerations.

To generalise the experience of operating high-speed systems in the world, the article describes the developed method that allows comparing different projects for organising high-speed rail with each other. The comparison is made according to the main characteristics of traffic: travel time between separation points, the traffic speed, the total length of the railway line. Identification of the patterns inherent in various projects for development of high-speed rail will make it possible to compare their technological parameters, to identify the scope of rational use of high-speed lines and areas of competition with other core types of transport.

Keywords: railways, passenger transportation, high-speed traffic, higher-speed traffic, dedicated passenger railway.

For citation: Vakulenko, S. P., Romensky, D. Yu., Kalinin, K. A. Typification of Projects for Development of High-Speed Rail. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 233–242. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-8>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Railway lines intended for high-speed transportation of passengers differ in their operational characteristics from other types of railway transportation [1; 2]. The implementation of high-speed traffic requires the construction of a new infrastructure, which is characterised by increased requirements for the profile and structure of the track superstructure, which enables passenger trains to develop a route speed between the main destinations above 180 km/h, which corresponds to the concept of modern passenger high-speed, interregional transport system. The existing infrastructure does not allow the movement of passenger trains in speed or high-speed mode due to the presence of infrastructural constraints, such as small radius curves. World practices testify to the following fundamental ways of organising high-speed transportation and its interaction with the existing railway transportation network:

- Separation of the infrastructure under construction and the formed routes of higher- or high-speed transportation from the rest of the railway network due to the need for physical isolation of rail tracks that have different permissible axle loads and different gauges, as well as of lines with different infrastructure affiliation [3]. Examples of the process of separating the network of high-speed lines from other railway sections can be observed in Japan and Saudi Arabia [4].

- Creation of a dedicated infrastructure for higher-speed passenger transportation with exits to the existing non-higher-speed railway infrastructure, with consistent modernisation of those lines but a significant reduction in speed of high-speed rolling stock when following them [4; 5].

- Inclusion of newly created railway sections for higher- and high-speed passenger transportation into a single route network with existing lines, while providing the possibility of high-speed rolling stock to use sections not intended for higher-speed traffic. The most prominent examples of implementation of such solutions can be found in Germany and France.

In all the cases, development of concepts and plans for creation of a HSR route network is based on topology and expertise drawn from operation of the existing network of mainline railways. Consequently, there is a difference in scale and volume of investment in creation and upgrading HSR infrastructure [7].

The development of the railway infrastructure of the main cargo and passenger railway lines in Russia resulted in a question of creation of dedicated tracks, with allocation of specialised infrastructure for high-speed passenger trains¹ [8]. The formation of a route network for circulation of passenger trains in long-distance traffic requires continuous improvement of methodological approaches and technical means of ensuring traffic with the ultimate goal to develop the backbone of high-speed railways to satisfy the demand for interregional passenger transportation, while ensuring a quality level that allows effectively competing with other types of mainline transport [9; 10].

The analysis of projects for development of dedicated passenger infrastructure in the world, as it was highlighted in our previous works, makes it possible to identify a certain regularity in the stage-by-stage development of high-speed railways from single reconstructed sections to an extensive network covering all major agglomerations that generate passenger flow [3].

The *objective* of the article, that reflects the advancement of the study on the typification of HSR, is to update the types of stages previously revealed but regarding implementation of development projects and to further develop the method to compare them while specifying main features.

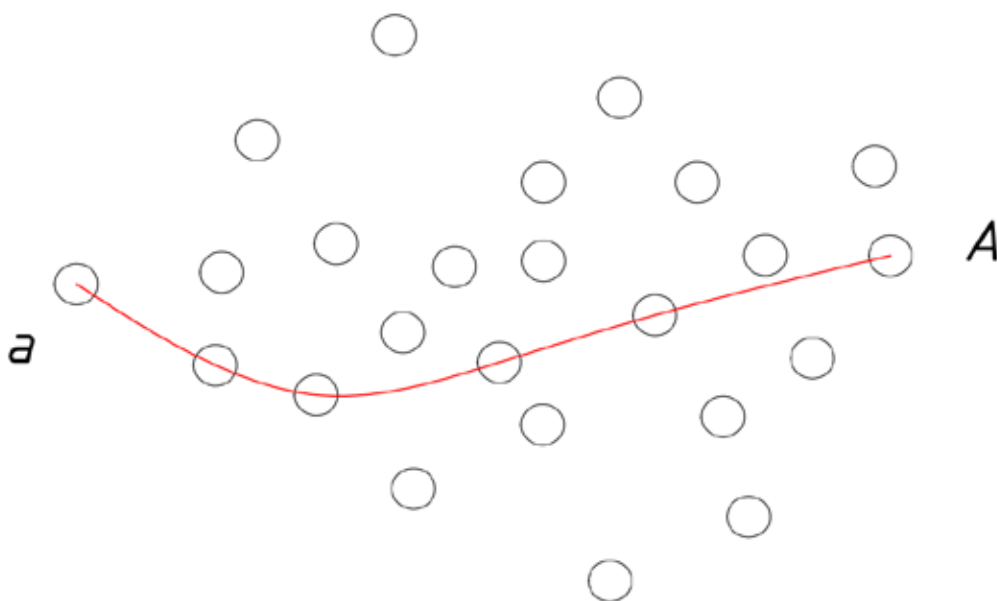
RESULTS

Let us consider the stages of evolutionary development of HSR in more detail.

The first stage in development of HSR is *the stage of development of the linear infrastructure* [3]. At this stage, a direction or section with the greatest prospective demand for speed and high-speed traffic is identified, a dedicated main section of HSR is built or existing infrastructure undergoes a significant modernisation. This section, as a rule, solves the task of connecting the capital city of the country with one of the major agglomerations.

Let us demonstrate a developed schematic representation of HSR line topology (Pic. 1), which indicates the main section connecting the starting point *a* and the end point *A* passing

¹ Vakulenko, S. P., Kulikova, E. B., Madyar, O. N. Passenger rail transportation. Organisation of passenger transportation in large transport hubs when assigning additional stops to passenger trains: Textbook. Ed. by Vakulenko, S. P. Moscow, Russian University of Transport, 2021, 148 p. ISBN 978-5-7876-0395-8.



Pic. 1. Linear structure of HSR development [[3], performed by the authors].

through a certain number of intermediate populated areas that form an ordered set. This requires modernisation of the track development of all the passenger stations, of terminal and intermediate ones as well, for circulation of high-speed passenger trains, depending on the intensity of passenger work and technological features of rolling stock maintenance [3]. Relevant target schemes were developed by the domestic scientific school²³ [11].

Such a linear structure is most characteristic of the beginnings of development of HSR networks in the pioneer countries of high-speed traffic which are France and Japan, and of new lines of passenger infrastructure in Morocco and Turkey (Pic. 2). After formation of a stable demand for transportation on the constructed linear high-speed infrastructure, there is a further development of high-speed infrastructure.

The second stage of HSR development is the *stage of tree infrastructure topology* [3]. As it follows from the name itself, at this stage initial

line is extended, a construction of HSR from the capital city to other megapolises beyond the boundaries of the initial route starts followed by the construction of feeder lines, providing transportation of passengers from other sites towards HSR [3].

The difference between the feeder sections and the main ones is their lower provision in equipment, lower requirements for the track profile. They are designed to carry a much smaller number of passengers compared to the volume of traffic on the main lines. Less demand for transportation is accompanied by smaller traffic on the section, and, as a result, increased time intervals between trains. When developing projects for feeder sections, the problem arises of minimising investments in development or reconstruction of the railway infrastructure. Therefore, existing reconstructed railway lines, updated to enable passage of trains with speeds above 140 km/h, can serve as feeder sections. A separate issue for consideration is the prospect of using single-track sections on such segments with low-intensity traffic, by analogy with the technical solutions used on high-speed lines in Spain [12–14].

A schematic representation of the tree topology of HSR is shown in Pic. 3, it consists of a main section similar to a linear scheme, as well as four feeder sections that connect individual stations of the set *a* and of

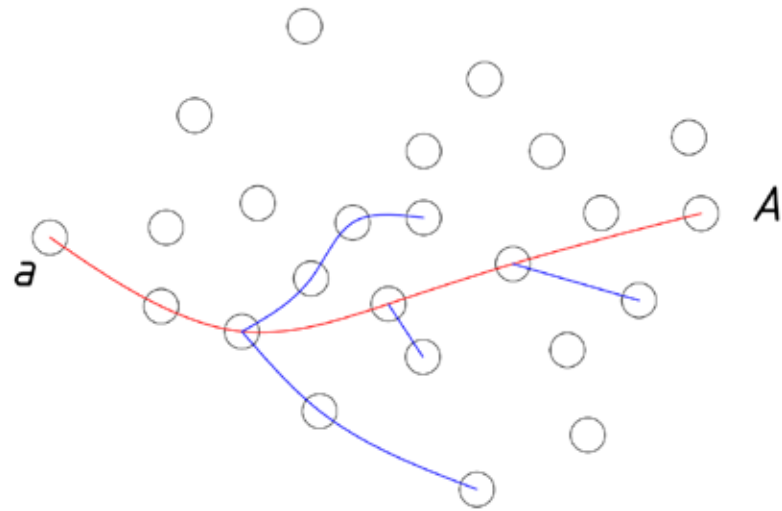
² Pazoisky, Yu. O., Saveliev, M. Yu., Sidrakov, A. A. [et al]. Railway passenger transportation (selected chapters): For students of the specialty 23.05.04 «Operation of railways» and education profiles 23.03.01 «Technology of transport processes», 23.03.02 «Management». Ed. by Pazoisky, Yu. O. Moscow, Russian University of Transport, 2020, 407 p.

³ Apatsev, V. I., Vakulenko, S. P., Golovnich, A. K. [et al]. Railway stations and nodes: Textbook. Moscow, Training methodological center for railway education, 2014, 856 p. ISBN 978-5-89035-674-1.





Pic. 2. Topology of Morocco's first high-speed railway, showing existing non-high-speed railway lines [3], performed by the authors using an open-source topographical survey at the openrailwaymap.



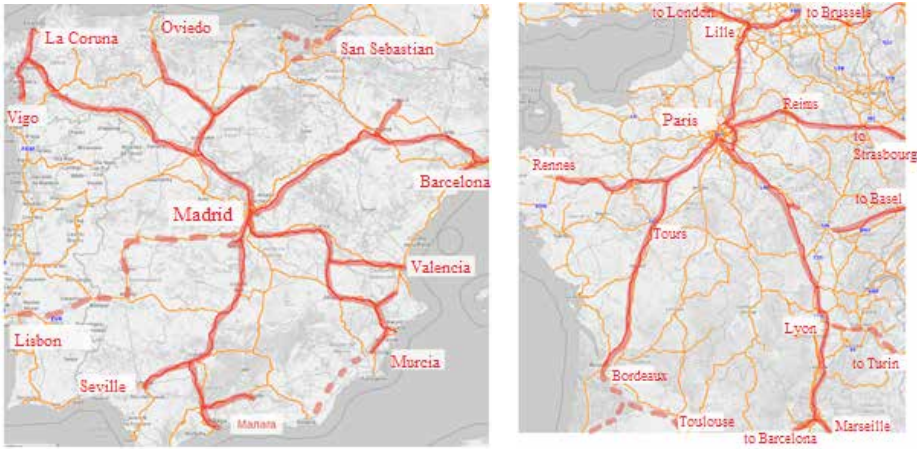
Pic. 3. Tree structure of HSR development [performed by the authors].

agglomerations that are not included in the service area of the main section. The route network is represented both by a route connecting the start and end points, and by routes following to branch lines (to feeder lines).

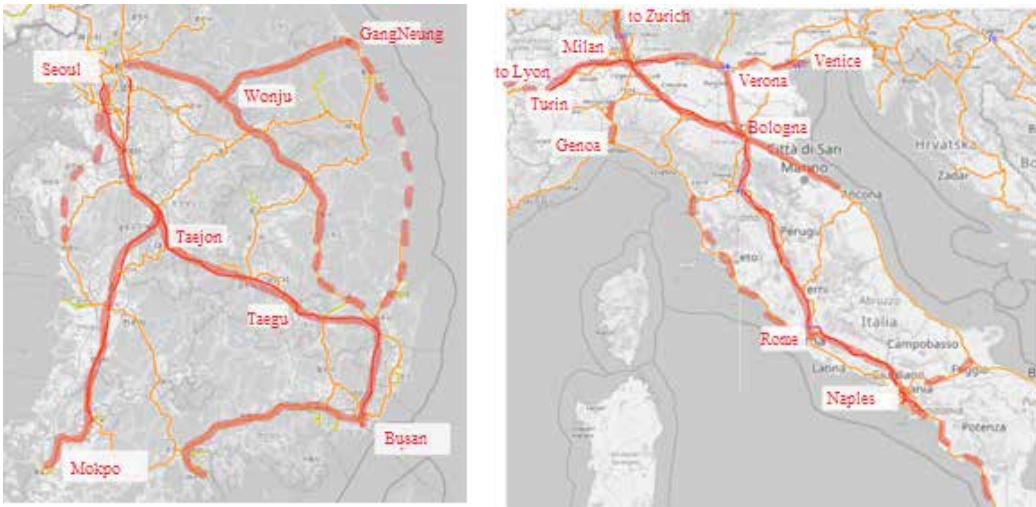
An extensive HSR network can be observed on the railways of countries that have been improving and developing their high-speed

passenger transportation network for decades, Japan, France, Spain, Italy, Turkey and South Korea can be good examples of such countries (Pics. 4–5).

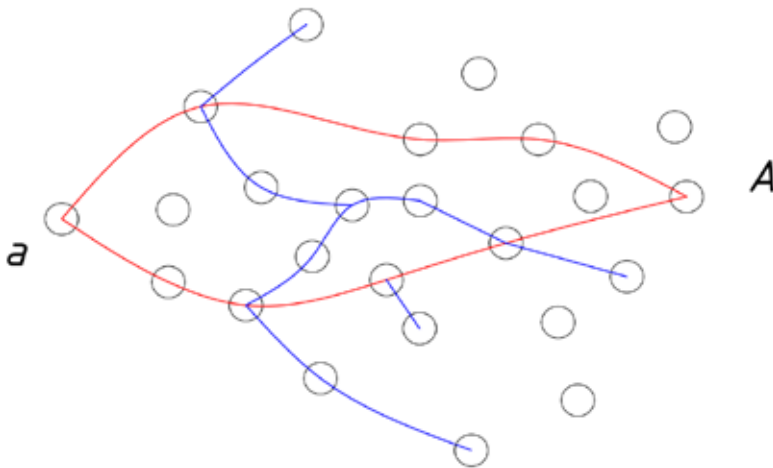
After formation of a stable demand for transportation through the constructed tree-like high-speed infrastructure, there is a further development of high-speed infrastructure.



Pic. 4. The topology of the HSR network of Spain (left) and France (right) with the designation of existing non-high-speed railway lines [performed by the authors using an open-source topographical survey at the openrailwaymap].



Pic. 5. High-speed railway network topology of South Korea (left) and Italy (right) showing existing non-high-speed rail lines [performed by the authors using an open-source topographical survey at the openrailwaymap].



Pic. 6. Network development structure of HSR [performed by the authors].

The third stage in development of HSR is *the stage of the infrastructure network topology* [3]. It supposes construction of high-speed railway lines, which can form parallel tracks where trains can run parallel to each other, i. e., ensure the connection of two points with each other by more than one option for a passenger train traffic. Construction is performed in new areas not covered by high-speed rail during the tree-like development of the network; new routes, feeder sections, and new main tracks are being added, creating the task of controlling traffic on parallel tracks.

The network topology of HSR is shown in Pic. 6, the diagram shows two main tracks connecting the starting point a and the end point A , which form a parallel connection of two points, as well as feeder lines that make up an extensive HSR network. Departure and destination in such a route network can be scheduled from any node or backbone passenger station that provides a stable passenger flow from the largest agglomerations within the considered transport corridor [15; 16].

Such type of development of dedicated passenger infrastructure can be found in Germany and China (Pics. 7–8).

To compare HSR networks in different regions of the world, it is important to assess technological mapping of the lines.

To evaluate the mapping parameters of HSR and identify the features of the project on the considered set of agglomerations through which the HSR line passes (hereinafter, the set $a = [1, 2, \dots, A]$), let us mark the points of departure and destination with coordinates x_a and y_a , while the reference point on the ground can be taken arbitrarily. The HSR line, passing through the cities [17] of the considered set a , forms an ordered subset $s = [1, 2, \dots, S]$, i. e., $a \supseteq s$. The number of settlements and passenger stations through which the HSR line passes affects the number of generated origin-destination routes [18; 19].

In turn, the increase in the number of origin-destination routes Tr_{ij} occurs non-linearly, the dependence of the total number of origin-destination routes on the number of separation points involved in the circulation of high-speed trains is shown in Pic. 9, and is determined by the formula:

$$Tr_{sum} = 0,5 \cdot S^2 - 0,5 \cdot S. \quad (1)$$

Since networks of different countries differ in their length and structure, different technological mapping, it is necessary to normalise the parameters of the networks under consideration.

A proposed algorithm, based on structural alignment method for technological mapping of dedicated passenger infrastructure, has been described by us previously [3]. Its main steps are as follow.

At the initial stage, for the considered network, *the directive origin-destination link* of the route is identified, which is a straight line connecting the main point of origin (denoted by I) and the main destination (denoted by J). This straight line can be described by the canonical equation of the line:

$$\frac{x_a - x_I}{x_A - x_I} = \frac{y_a - y_I}{y_A - y_I}, \quad (2)$$

where x_I and y_I – coordinates of the point of departure I relative to an arbitrarily accepted reference point;

x_A and y_A are respectively the coordinates of the main destination J .

«After that, it is necessary to eliminate the free coefficient of the linear equation, for this it is necessary to shift the origin of the coordinate axis to the starting point of directive correspondence» [3]:

$$\begin{cases} x'_a = x_a - x_I \\ y'_a = y_a - y_I \end{cases} \quad (3)$$

After adjusting the position of all considered points characterising the position of individual points on the plane, the function describing the defining correspondence (2) will take the form:

$$y = \frac{y_A}{x_A} x, \quad (4)$$

where component $\frac{y_A}{x_A}$ characterises the tangent of the angle of deviation of the directive origin-destination function from the abscissa axis, then, to determine the angle of inclination in radians:

$$\alpha = \arctg \frac{y_A}{x_A}. \quad (5)$$

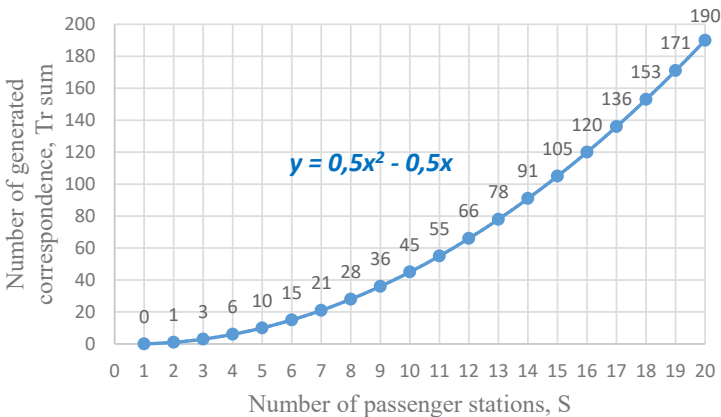
«To obtain the final coordinates of the points of the considered array of potential-forming points, it is necessary to eliminate the angular component of the directive origin-destination link. For this, if the end point of the directive origin-destination link is in the 1st ($x'_A > 0; y'_A > 0$), or 4th ($x'_A < 0; y'_A < 0$) quarter of the coordinate



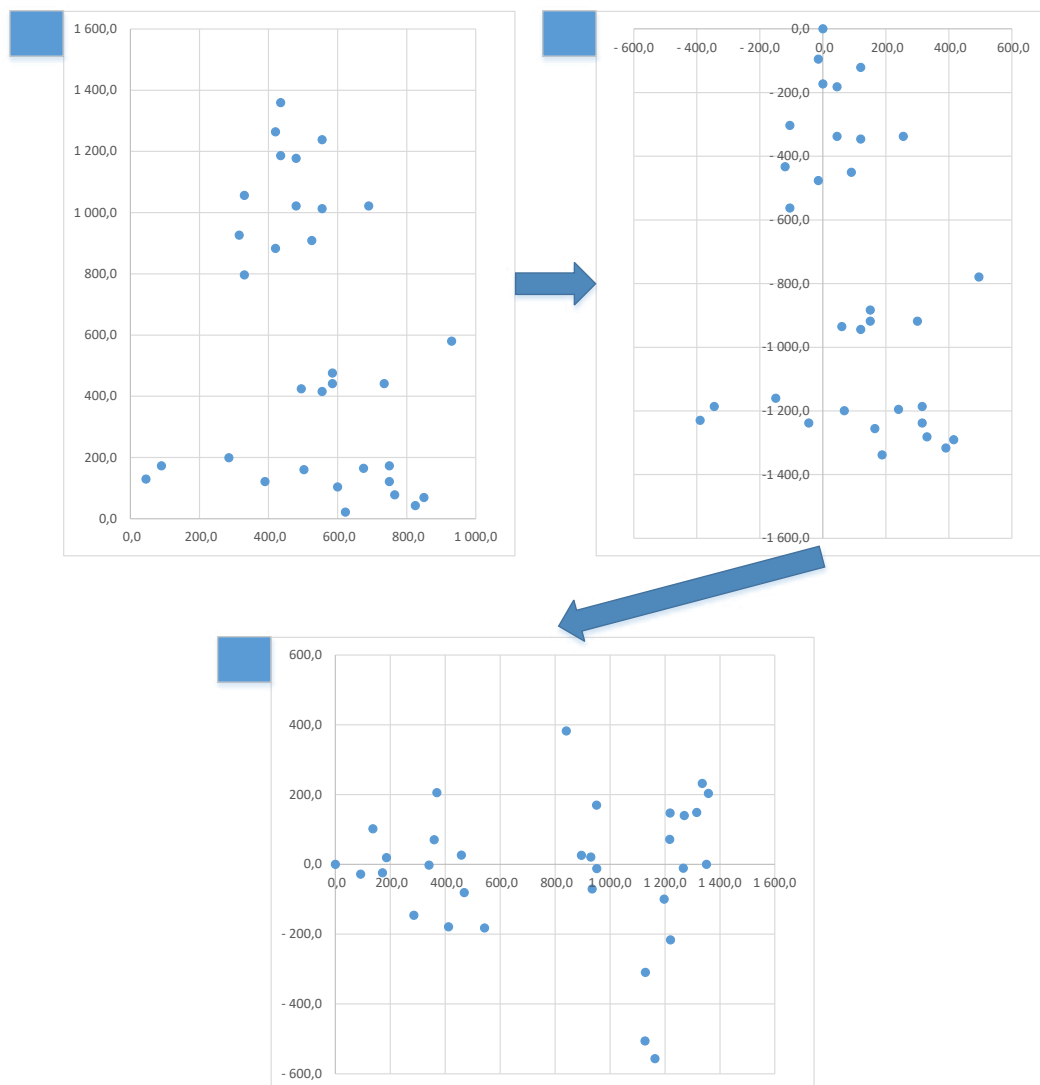
Pic. 7. The topology of the German HSR network [performed by the authors using an open-source topographical survey at the openrailwaymap].



Pic. 8. Topology of the HSR network of northern China (left) and central China (right) [performed by the authors using an open-source topographical survey at the openrailwaymap].



Pic. 9. Number of generated passenger origin-destination routes, depending on the total number of passenger stations on the HSR line [[9], performed by the authors].



Pic. 10. Alignment of coordinates of a single HSR network [performed by the authors].

plane, the final coordinates of the points will be determined as:

$$\begin{cases} x_a'' = x_a' * (\cos(-\alpha)) - y_a' (\sin(-\alpha)) \\ y_a'' = x_a' (\sin(-\alpha)) + y_a' (\cos(-\alpha)). \end{cases} \quad (6)$$

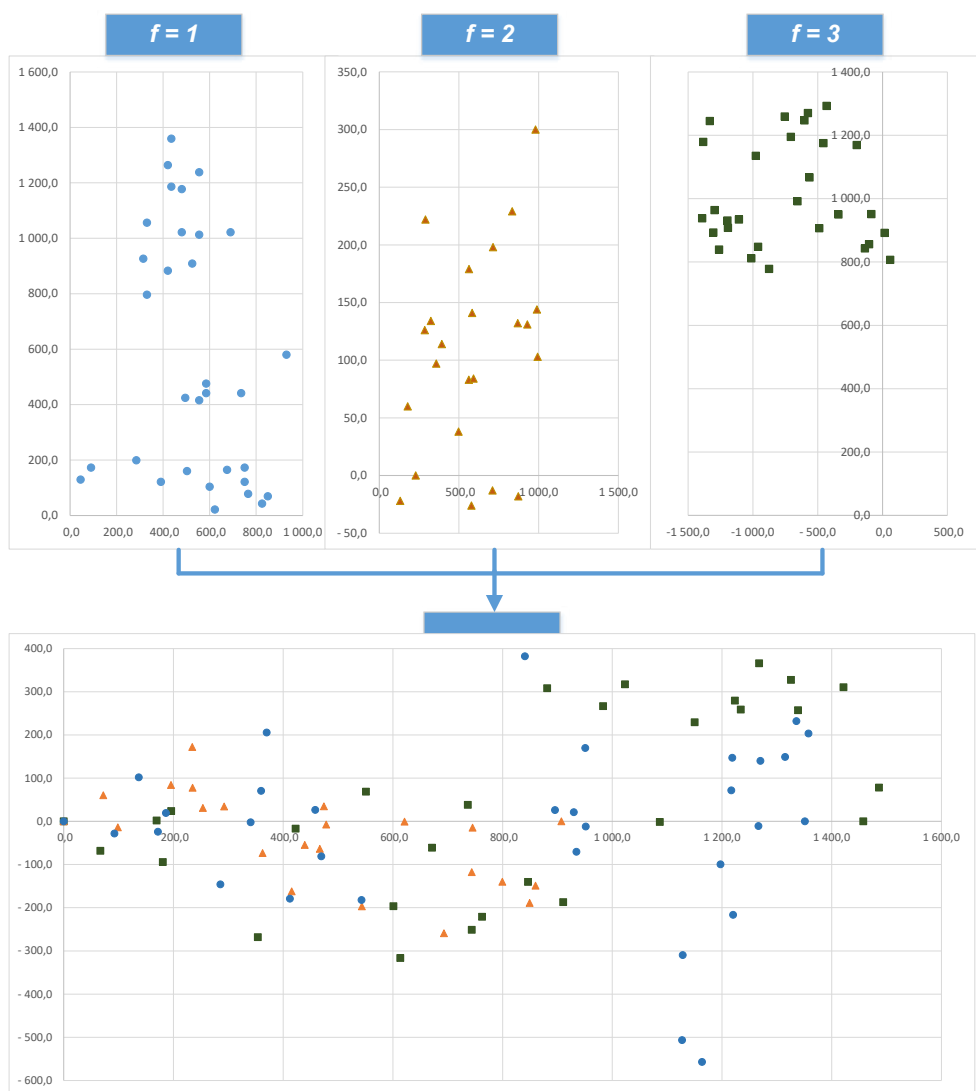
If the end point of the directive correspondence is in 2nd ($x_A' < 0; y_A' > 0$) or 3rd ($x_A' < 0; y_A' < 0$) quarter of the coordinate plane, the final coordinates of the received points must be inverted» [3] (7).

$$\begin{cases} x_a'' = -(x_a' * (\cos(-\alpha)) - y_a' (\sin(-\alpha))) \\ y_a'' = -(x_a' (\sin(-\alpha)) + y_a' (\cos(-\alpha))). \end{cases} \quad (7)$$

Structural alignment for a single HSR network is shown in Pic. 10. Scheme 10a shows the initial set of points that reflect the position of individual points on the map. In Pic.10b, the

coordinates of these points are shifted relative to the reference point (3), and Pic. 10c shows the result of the structural alignment of the set of points.

When analysing several HSR systems (each system will be an element of the set $f = [1, 2, \dots, F]$) the position coordinates of separation points on the HSR network of different f should be considered as $x_{f,a}$ and $y_{f,a}$. The application of the described algorithm for the elements F of the set f will allow using the methods of statistical analysis to identify patterns in development of HSR systems and the influence of mapping features on the overall competitiveness of a high-speed traffic. An example of using the developed



Pic. 11. Alignment of the coordinates of the set of HSR networks [performed by the authors].

method for $F=3$ is shown in Pic. 11, which presents three abstract point sets of HSR networks, $f1, f2, f3$.

BRIEF CONCLUSIONS

Identification of the patterns inherent in various projects for development of high-speed railways will allow comparing the technological parameters of these lines, as well as to study the role of HSR in a country's transport system, the scope of rational use of HSR and areas of competition with other modes of mainline transport. The described research method allows identifying the general patterns of passage of sections of dedicated passenger infrastructure

through the settlements of the set a generating passenger flow for main modes of transport. The obtained values clearly demonstrate the differences in projects for development of high-speed traffic of railway networks of the set f , aimed at ensuring the stable connection of each pair of points of departure i and destination j , all provided origin-destination links Tr_{ij} . Based on the results obtained, it is possible to build predictive models for determining the demand for high-speed transportation in Russia.

REFERENCES

1. Hu, B. [et al]. Statistical Analysis and Predictability of Inter-Urban Highway Traffic Flows: A Case Study in Heilongjiang Province, China. *Transportmetrica A*:

Transport Science, 2020, Vol. 16, pp. 1062–1078. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1720039>.

2. Yang, Z. Cheng, J. Optimization of trip-end networks and ride price for express coach systems in the high-speed rail era. *Promet – Traffic – Traffico*, 2017, Vol. 29, No. 6, pp. 581–592. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v29i6.2271>.

3. Vakulenko, S. P., Romensky, D. Yu., Kalinin, K. A. Typification of the structures of high-speed main railways [Tipizatsiya struktur vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей]. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2022, Iss. 11, pp. 40–50. [Electronic resource]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49944780EDN: GJTPMF> [paid access].

4. Kiselev, I. P. Half a century of high speed: on the occasion of the 50th anniversary of the opening of the world's first Tokyo–Osaka high-speed rail line [Polveka vysokoi skorosti: k 50-letiyu otkrytiya pervoi v mire vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali Tokio–Osaka]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2015, Iss. 2, pp. 70–77.

5. Kiselev, I. P., Kitunin, A. A. China's «harmony»: experience in localisation of high technologies of rail transport. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2013, Iss. 2 (45), pp. 38–41. EDN: QANRFX. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19034215>. Last accessed 13.01.2023.

6. Kiselev, I. P., Kitunin, A. A. High-speed rail transport of the People's Republic of China: from first high-speed lines to the Eurasia mega-project. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2018, Iss. 1 (74), pp. 9–14. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32637975>. EDN: YSURGO. Last accessed 13.01.2023.

7. Kalinin, K. A. Integrated approach to the analysis of HSR lines. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2021, Iss. 2 (82), pp. 137–147. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_2_137.

8. Borodin, A. F. Problems of developing the General Scheme for development of the railway network of JSC Russian Railways. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2017, Iss. 8, pp. 34–42. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29967620>. EDN: ZFUHZR [paid access].

9. Seredov, E. A. Formation of the route network of passenger trains taking into account the preferences of passengers. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 2021, Iss. 11, pp. 34–43. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47381345>. EDN: GAOOYX. Last accessed 13.01.2023.

10. Pazoisky, Yu. O., Saveliev, M. Yu., Seredov, E. A. Using the methods of fuzzy set theory for development of passenger flow [Ispolzovanie metodov teorii nechetkikh mnozhestv dlya osvoeniya passazhiropotoka]. Fedor Petrovich Kochnev – an outstanding organizer of transport education and science in Russia: Proceedings of the international scientific and practical conference. Moscow, April 22–23, 2021. Chief ed. A. F. Borodin, comp. by R. A. Efimov. Moscow, Russian University of Transport, 2021, pp. 328–332. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46552816>. EDN: VFOGPF. Last accessed 13.01.2023.

11. Sidrakov, A. A. Organisation of high-speed passenger transportation in long-distance traffic. Ph.D. (Eng) thesis. Moscow, 2012, 182 p.

12. Kalidova, A. D. Justification of the configuration of single-double-track lines in organization of high-speed train traffic. Ph.D. (Eng) thesis. Novosibirsk, 2019, 194 p.

13. Kalidova, A. D. Determining the conditions for the use of single-double-track elements for a high-speed line [Opredelenie uslovii primeneniya odnoputnykh-dvukhputnykh elementov dlya skorostnoi linii]. Innovative factors of transport development. Theory and practice: Proceedings of the international scientific-practical conference, Novosibirsk, 19–20 October 2017. Novosibirsk, Siberian State Transport University, 2018, pp. 24–29. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35237003>. EDN: XSWRYT [paid access].

14. Karasev, S. V., Kalidova, A. D. Modelling of train flow handling through a limiting single-track section of the route at the organisation of high-speed operation using the existing infrastructure. *Russian Railway Science Journal*, 2018, Vol. 77, Iss. 1, pp. 34–43. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43.

15. Zhang, Q. [et al]. Simultaneous optimization of train timetabling and platforming problems for high-speed multiline railway network. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Vol. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6679008>.

16. Wang, Y., Han, B., Wang, J. A passenger flow routing model for high-speed railway network in different transportation organization modes. *Promet – Traffic – Traffico*, 2018, Vol. 30, No. 6, pp. 671–682. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i6.2733>.

17. Kalinin, K. A., Romenskaya, M. V. Options for introducing high-speed railway lines to cities, their impact on operation of railway junctions and development of agglomerations [Varianty vvoda vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей v goroda, ikh vliyaniye na rabotu zheleznodorozhnykh uzlov i razvitiye aglomeratsii]. Sustainable development of territories. Collection of reports of 2nd International Scientific and Practical Conference, Moscow, 20–21 May 2019. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2019, pp. 196–198. EDN: AHUNJT. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41253060>. Last accessed 13.01.2023.

18. Vakulenko, S. P., Romensky, D. Yu., Kalinin, K. A. Method of forecasting passenger flows in organization of high-speed transportation. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2021, Iss. 1–2 (92–93), pp. 34–39. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46108216>. EDN: NURFGK. Last accessed 13.01.2023.

19. Vakulenko, S. P., Kalinin, K. A. Application of hexagonal analysis to determine the parameters of passenger traffic correspondence [Primenenie geksagonalnogo analiza dlya opredeleniya parametrov korrespondentsii passazhirskikh perevozok]. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2022, Iss. 2, pp. 3–10. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-1. ●

Information about the authors:

Vakulenko, Sergey P., Ph.D. (Eng), Professor, Director of the Institute of Management and Digital Technologies of Russian University of Transport, Moscow, Russia, post-uit@bk.ru.

Romensky, Dmitry Yu., Ph.D. (Eng), Senior Lecturer at the Department of Management of Transport Business and Intelligent Systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia, dimeromy@yandex.ru.

Kalinin, Kirill A., Assistant Lecturer at the Department of Management of Transport Business and Intelligent Systems of Russian University of Transport, Moscow, Russia, kalinin.k.a@mail.ru.

Article received 23.01.2023, approved 17.04.2023, accepted 21.04.2023.

**RAIL
EQUIPMENT 254**TRANSPORT
LAW 263

Driverless cars: the theory paves the way for new laws and regulations.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-9>World of Transport and Transportation, 2023,
Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 244–253

Bifurcation Points of Carbon Regulation



Boris A. LYOVIN



Victor Ya. TSVETKOV



Nikolay V. ISAIN



Andrey L. OKHOTNIKOV

Boris A. Lyovin¹, **Victor Ya. Tsvetkov**²,
Nikolay V. Isain³, **Andrey L. Okhotnikov**⁴

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

^{3,4} JSC NIAS, Moscow, Russia.

✉ ² cvj2@mail.ru.

² SPIN-code 3430-2415, AuthorID 140020 (Russian science citation index).

³ SPIN-code 6471-3356, AuthorID 1177738 (Russian science citation index).

⁴ SPIN-code 9528-4823, AuthorID: 916989 (Russian science citation index).

ABSTRACT

There are 1800 climate change laws around the world. In recent years, the rapid increase in carbon emissions has caused global warming and climate pollution, causing serious harm to social development and human health. Reducing carbon emissions is getting a lot of attention. Since the Kyoto Protocol and the Paris Agreement, many countries have made efforts to reduce carbon emissions.

The article describes the international processes intended to adopt regulations on greenhouse gas emissions, including the regulated market for quotas and the voluntary market for reducing greenhouse gas emissions. The emphasis is on European and

Russian quota mechanisms. The stages of development of transborder carbon regulation in the EU are highlighted. It is noted that in Russia, the leader in application of ESG criteria is JSC Russian Railways, as a company that is consistently pursuing the transition to implementing the principles of sustainable development.

The conclusions on international trends in development of carbon regulation are followed by proposals on solutions regarding problematic aspects of the new Russian carbon legislation. According to the authors, the target scenario remains the transition to a new technological structure ensuring a real reducing the carbon footprint.

Keywords: transport, sustainable development, ecology, carbon market, carbon emissions, decarbonization, climate agenda, greenhouse gases, CO₂ emissions, ESG.

For citation: Lyovin, B. A., Tsvetkov, V. Ya., Isain, N. V., Okhotnikov, A. L. Bifurcation Points of Carbon Regulation. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 244–253. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-9>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

Nowadays, the terms «principles of sustainability», «ESG criteria», «carbon footprint», «climate projects», «quotas», «greenhouse gases» or «decarbonisation» are widely used in the media. In parallel, various thematic and sectoral events and forums are held on these current topics of sustainable development. New educational programs and courses are being launched, including those initiated by higher educational institutions and corporate scientific institutes. Sections and chapters on sustainable development are included in all development strategies and programs of the largest companies in the Russian Federation. In many aspects, the leader in the application of ESG criteria is JSC Russian Railways, as the operator of the most environmentally friendly mode of transport with CO₂ emissions of 0,7 % of all emissions from the Russian transport sector [1]. Russian Railways Holding company identifies one of the significant aspects of achieving its strategic goals as a consistent transition to implementation of the principles of sustainable development in accordance with ESG criteria: *Environment* (responsible attitude towards the environment), *Social* (high social responsibility), *Governance* (high quality of corporate governance).

The *objective* of the study is to analyse new Russian legislation in the field of reducing greenhouse emissions and review the current state of development of sustainable development processes in the field of decarbonisation. The main research *methods* are statistics, comparative, qualitative, and system analysis.

The article offers description of international processes of regulating greenhouse emissions and presents the general results of the study on the current status of sustainable development processes in the field of decarbonisation, as of the main ESG criterion from the point of view of regulatory impact. The article focuses on bifurcation analysis of carbon regulation from the point of view of strategic and operational planning of the «green economy» by the persons releasing greenhouse gas in the Russian Federation.

RESULTS

International Processes

International processes for regulating greenhouse gas emissions are in two planes: a regulated market for quotas and a voluntary market for reducing greenhouse gas emissions.

The global turnover of the regulated quota market (for example, the QTS – the quota trading

system) is approximately 150 times larger than the voluntary market in monetary terms. To understand the scale of these processes, we note that in 2021 the global turnover of the QTS market amounted to about 260 billion US dollars. The main goal of introducing quotas is to reduce greenhouse gas emissions by 55 % by 2030 and achieve carbon neutrality by 2050, which is regulated by the international obligations of countries under the Kyoto Protocol and the Paris Agreement. The release of quotas into circulation in a few countries forms the revenue side of the budget system, and the secondary market for unused quotas forms the revenue of commercial organisations.

Quotas in the EU were initially issued free of charge. At the same time, the limit of free quotas will tend to zero by 2032–2035. There is a general gradual tendency for their value in the QTS to increase with a decrease in physical supply. Both of these factors have gradually contributed to an increase in the average price of emission allowance in the EU to 90 US dollars per tonne of greenhouse gas CO₂ equivalent. In some countries, instead of quotas, only emissions penalties are used; there are also hybrid options – a quota plus a fine if it is exceeded. In any case, according to various forecasts, the cost of quotas or fines for emissions tends to be 100 US dollars or more per ton of CO₂-equivalent greenhouse gas emissions.

There are 25 national quota systems in the world, which determines their low compatibility in case of introduction of transnational taxes, payments, fees, or special carbon certificates. In practice, this means, for example, that it is not possible to use a third country's carbon credit or its monetary equivalent instead of purchasing a European carbon certificate. This scenario will be relevant in case of introduction of transnational fees for the import into the EU market of foreign products with a large carbon footprint during their production. The list of products is already known; from 2025, the extension of the list of products imported by the EU that are subject to the transnational tax is possible.

The problem of double counting on a global scale also persists when quotas are offset by different countries. For example, now the Ministry of Economic Development of the Russian Federation is working to provide access to international verifiers to the Russian market, primarily from the PRC. This will allow Russian issuers to register their climate projects according



to Chinese standards. The Chinese side will buy and credit emission reduction units issued in the Russian Federation as a result of implementation of a certain climate project. At the same time, the Russian Federation will take credit for reduction in emissions under the same climate project.

In the framework of development of the European quota system, the *CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism)* mechanism was launched – transboundary carbon regulation developed within the framework of the adopted «Green Deal» (Resolution of the European Parliament and the Council approving the *CBAM* mechanism) [2]. This mechanism algorithmizes the collection of carbon tax within the framework of transboundary carbon regulation (hereinafter referred to as TCR) and is officially aimed at encouraging trading partners to reduce greenhouse gas (GHG) emissions, as well as the carbon footprint of energy-intensive products exported, primarily to Europe.

The stages of development of transboundary carbon regulation in the EU today are as follow:

1. For the period 2023–2025 the TCR mechanism is aimed at quarterly collection of data on the volume of «direct» carbon footprint from production of certain types of imported products (iron, steel, aluminium, cement, fertilisers, electricity) and does not involve payment of fees.

2. By the end of 2025, the European Commission will assess the TCR system and decide on expanding the scope of the mechanism to other goods.

Since 2026, the TCR will require suppliers to purchase greenhouse gas emissions certificates based on the carbon intensity of their products, where the cost per unit of emissions will be determined by the internal weekly average auction price of the EU emissions trading system. In theory, however, importers would be able to account for the carbon price paid within the national emissions accounting system to avoid double taxation.

In general, based on international trends, we note:

- In the future, the inclusion into the list of TCR regulated products of oil refining and petrochemical products after expiration of the transition period in 2025 is not excluded. The least losers will be those companies that effectively manage the time remaining before the levy is introduced.

- Companies should start measuring their carbon footprint, track the cost of carbon

emissions and their impact on overall costs, and plan actions for various scenarios.

- It is necessary to identify sectors in which products have a carbon intensity higher than those of the main competitors supplying the EU market and analyse how to reduce the carbon footprint of products.

- One of the ways to avoid TCR payments is to switch to the export of a range of goods of higher value added and avoid the export of basic raw materials and materials. Other possible measures could be passing on additional costs to the consumer (considering TCR in pricing, if acceptable) or reducing other costs to compensate for the negative effect of transboundary carbon payments.

However, the target scenario remains the transition to a new technological structure with a real reduction in the carbon footprint.

The voluntary market, unlike the state-regulated quota market, is not mandatory. Accordingly, issuers' entry into the voluntary market may be driven by their personal need to become carbon neutral and/or a desire to create green premium products.

In the first case, the benefits of a carbon-neutral company status include rating preferences, preferential financing, or access to a previously closed financing market, including through the issuance of «green» bonds, as well as image background for a public company.

In the second case, the transition to production of «green» products can increase their cost and competitiveness and, among other things, provide access to new markets, which, more precisely, means the absence of bans on previous supplies as part of the global «green» agenda. In essence, the release of voluntary carbon units (credits, offsets; hereinafter, CU) into circulation is associated with the fact that a company planning to level out the carbon intensity of its products acquires voluntary CU from another company that has implemented a climate project (hereinafter, CP), as a result of which greenhouse gas emissions were prevented or absorbed. As a result of such a transaction, the company, investing in implementation of CP by other organisations, receives a formally neutral or low-carbon product, since the volume of greenhouse gas released during its production was offset by absorption or reduction of emissions of the same amount of greenhouse gas in another project.

The general «green» decarbonisation scheme is as follows: a company invests in an eco-

project, for example, landscaping an area or building a gas boiler house instead of a coal one, registering the project as climate-friendly according to the selected voluntary standard, then releases a certain calculated volume of carbon units, which it receives by reducing CO₂ emissions [3]. And further, from its carbon account it is possible to sell the issued emission reduction units or commensurately increase the cost of its now «premium» products. A climate project does not have to be implemented in the company as part of its core business. No one is stopping people from replanting deforested forests in Indonesia or increasing absorption of greenhouse gases by planting forests in the tundra. This is especially true for extractive industries, where the ability to reduce CO₂ emissions is significantly lower than in other industries. For example, the forced commissioning of a booster compressor station can increase the CO₂ emissions of a gas production company by 10 times.

There are about 30 voluntary CU certification programs (standards) in the world, among which the largest ones stand out:

1. Verified Carbon Standard (VCS), USA – exchange / over-the-counter platforms (OTC).
2. The Gold Standard (GS), USA – OTC.
3. Global Carbon Council (GCC), Qatar – OTC.
4. China GHG Voluntary Emission Reduction Program (CCER), PRC – exchange.
5. Clean Development Mechanism (CDM), UN – OTC.

The cost of CU when released into circulation according to different standards ranges from 3 to 20 US dollars per 1 ton of CO₂ and does not depend on the volume of investment in the climate project. From the point of view of direct payback on production and sale of CU, considering the significant costs of the climate project, the required volume of CO₂ emissions reduction should reach at least 200–300 thousand tons of CO₂. At the same time, the costs must also include the cost of registering a climate project and issuing CU. For European and American voluntary standards, the cost of issuing CU can be 200–250 thousand US dollars per 1 CP.

The main weaknesses of the voluntary carbon market include the heterogeneity of issued CU (due to significant differences in regulation of international standards and trading platforms), insufficient liquidity and opacity of pricing for CU [4]. UN and US CU issuance standards

prohibit the use of voluntary CU to offset mandatory quotas. In China, in this case, there is a little more loyalty – a Chinese company can use up to 5 % of issued CU to offset quotas.

Russian Practices

As part of fulfilment of international obligations, the Russian Federation plans to reduce greenhouse gas emissions by 1,5–2 % annually until 2060. Unlike the EU, the Russian Federation has a large resource for absorbing greenhouse gases through land use and forestry. Our country wants to use this resource to offset its emissions, partially reducing them, which makes our approaches to decarbonisation similar to North America, where absorption of natural resources is also high. Accordingly, the Russian Federation is currently at the active stage of developing a national regulatory framework for carbon regulation (about 30 legal acts were adopted during the period from 2021 to 2022), systems of independent verification, circulation of carbon units and quota fulfilment units (when emissions are less than the quota).

In June 2021, Russia adopted the first key climate Federal Law No. 296 «On Limiting Greenhouse Gas Emissions» (hereinafter referred to as FZ-296), which involves regulations on reduction of greenhouse gas emissions, introduction of «green» certificates and climate projects [5]. This legal act does not imply the active use of mandatory climate regulation instruments (including introduction of a carbon tax or emission quotas) at the federal level. At the same time, participation in CP, creation and state support of which are provided for in the document, may be attractive to the corporate sector. At the same time, in accordance with the law, participants in such projects can transfer carbon units to other legal entities, which lays the foundation for trade in carbon units.

As part of development of the Russian CU trading system, on September 26, 2022, the first Russian trading started at commodity auctions held by the National Commodity Exchange (NTB, Moscow Exchange group). At the end of the first day, two purchase and sale transactions were concluded with a total volume of 20 CU. The weighted average selling price was 1000 rubles per CU [6].

It is important to note that if the CP is implemented on the territory of the Russian Federation and its results are verified according to the Russian national standard, the issued CU



will not be recognised on the international market and, accordingly, cannot be sold on the international exchange. To enter the international market for the sale of CU, certification according to international standards is required; accordingly, at present, the current legislation of the Russian Federation does not establish the possibility of recognising CU issued or purchased abroad. It should also be noted that given the current political situation, the possibility of Russian companies to enter international exchanges may be limited and complicated.

In March 2022, the second key climate Federal Law No. 34 «On conducting an experiment to limit greenhouse gas emissions in certain constituent entities of the Russian Federation» (hereinafter referred to as FZ-34) was adopted, according to which Sakhalin region will become a pilot region in which carbon neutrality will be achieved by the end of 2025 [7]. The key objectives of the experiment are formation of a system of independent verification and creation of a system for circulation of carbon units and quota fulfilment units (the excess of quotas over emissions) [8]. It is expected that in the future the experiment will be continued in the territories of other constituent entities of the Russian Federation.

Note that the first experimental region, Sakhalin region, generates 12,3 million tons of CO₂-equivalent emissions with absorption of 11,1 million tons. Pure net emission (emissions minus absorption) is 1,2 million tons of CO₂ equivalent [9]. As part of the experiment, 70 % of net emissions will be borne by the subject (implementation of budget projects on renewable energy, gasification, energy saving and waste disposal). The remaining 30 % was distributed among emitters, which together account for 75 % of emissions. New regions of the Russian Federation that have declared their desire to participate in the quota experiment already have negative net emissions (for example, Irkutsk region) or are on the border of complete absorption of 1–3 million tons of CO₂ (Kaliningrad region, Khabarovsk region, Republic of Bashkortostan, Nizhny Novgorod region). It turns out that the plans to launch the experiment and develop the quota methodology concern, first, entities with small net emissions. Each region that will join the experiment may have its own criteria for determining the list of enterprises participating in quotas. Therefore, the Federal Government will set them for each constituent

entity, calculating the best model for the it to achieve neutrality. To do this, a constituent entity of the Russian Federation must conduct an inventory of emissions and absorption of greenhouse gases, assess the consequences of the experiment for the region's budget and business, word the expected trajectory for reducing greenhouse gas emissions and approaches to distribution of quotas between regional organisations subject to regulation. According to the approved «criteria for classifying legal entities and individual entrepreneurs as organisations subject to regulation, dated 14.03.22, No. 355» from 01.01.2025, enterprises with GHG emissions of more than 50 thousand tons of CO₂ equivalent per year fall under regulation [10]. From 01.01.2025, organisations subject to regulation will be required to annually issue and verify a GHG Emissions Report for the previous year.

In general, in the Russian Federation in 2020, GHG emissions amounted to 2,1 billion tons of CO₂ equivalent. Absorption through land use and forestry accounted for 0,5 billion tons of CO₂ equivalent. Thus, net emissions in the Russian Federation amounted to 1,6 billion tons. The number of constituent entities where emissions exceed absorption (net positive emissions) is about 10 regions. However, for other regions with negative net emissions, if a constituent entity of the Russian Federation absorbs more than 100 % of its emissions, non-proliferation of the quota regime is not guaranteed. This is quite logical and natural, since constituent entities that are «good» in terms of net emissions have got that position due to their historical geographical location, and not because of their targeted regional investment policy. And without participation of «good» entities in the quota regime, it will be almost impossible to achieve carbon neutrality in the Russian Federation. Accordingly, a compensation mechanism for distributing quotas to regions with negative net emissions may be required.

One of the ways to formally reduce emissions by export-oriented enterprises is to restructure asset portfolios based on the intensity of carbon dioxide emissions.

Also, in recent years, the use of ESG criteria has been actively developing and becoming relevant, being implemented in the Russia Federation in the form of a «green taxonomy». This system was developed with participation of VEB.RF as a methodological centre for financial

instruments for sustainable development and is aimed at ensuring the flow of investments from high-carbon sectors of the economy to low-carbon ones, including through the provision of:

- Preferential «green financing» for eco-projects.
- Bank guarantees for «green» projects.
- Consideration of the issuer's ESG rating in its borrower rating.

VEB.RF, considering world practices (ICMA, CBI, IDFC, European Union), has developed standards for «green» financing (requirements for the verification system) and a system of criteria for «green» projects, including [11]:

- Reduction of carbon dioxide emissions.
- Increasing the rate of recycling of materials.
- Protection and restoration of biodiversity and natural sites.

For example, for implementation of a «green» project, a subsidy from the federal budget may be provided in the form of compensation for part of the interest rate for the period of the investment phase of the project. Thus, the «green taxonomy» system encourages investors to implement climate projects and is one of the existing mechanisms for reducing GHG emissions in Russia.

A landmark example of introduction of «green» technologies in non-resource sectors is the project for organising railway traffic using trains powered by hydrogen fuel cells on Sakhalin. Based on the results of consideration of the concept and results of a comprehensive financial model of the project for development of railway transportation using hydrogen fuel cells, JSC Russian Railways, the Government of Sakhalin region, Rosatom State Corporation and JSC Transmashholding signed a protocol recognising the hydrogen project as expedient and technically feasible. The launch of passenger service on hydrogen trains on Sakhalin is expected to take place before the end of 2025. It is necessary to create a small-scale hydrogen production facility and a network of fuelling complexes directly on Sakhalin, form a pilot site and launch regular passenger rail service. A competency centre will be created at the island's university to train the necessary personnel.

In a strategic plan, to assess the degree of development of the company («as it is now» and «where to go») in the field of sustainable development, including in terms of the environmental component, it is possible to take two non-mutually exclusive paths:

1. Independently assess the scale of the «disaster» if there are the competencies within the company.

2. With the help of an external consultant, make a rating assessment for all three segments of sustainable development (Environment, Sociology, Governance) in one of several Russian rating companies, considering the criteria and requirements for the verification system of sustainable development projects in the Russian Federation. The methodologies used by rating companies are publicly available on the websites of the relevant organisations [12, 13].

It is important to note that the absence of obvious direct effects from participation in the «green» agenda for small companies does not remove the relevance of this topic for them, for at least two reasons:

1. It's easier to immediately put a small company or startup on the right track than later to turn around or restructure a large business.

2. The environmental segment for business is an important component of the overall concept of «sustainable development» or ESG principles. By structuring all three segments (Environment, Social and Governance), new growth horizons and opportunities for business optimisation can open for the company.

To structure the Russian processes of circulation of CU (carbon units, formed on the voluntary market for reducing GHG emissions) and QFU (units of quota fulfilment, formed in the volume of emissions reduction below the quota) and selecting a target scenario for the monetisation of greenhouse emissions, the following scheme can be considered (Figure below). A combination of scenarios is possible depending on the dynamics of the ratio of emissions and the issuer's quota in each individual case.

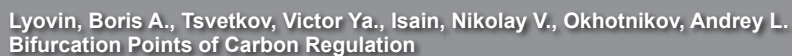
In general, the advantages for any company in creating a «green economy» are as follows:

- Anchor clients: the company's compliance with green principles opens access to preferential financing, scaling and opportunities to be in the supply chain of industry leaders, including large holding companies and corporations with public participation.

- Personnel: choosing the «be on trend» strategy allows receiving the best ambitious personnel and remaining an attractive employer. In this case, the phrase «employees decide everything» is quite appropriate.

- Competitiveness: a strategic advantage is maintaining competitiveness, especially for





tomorrow, when the next technological cycle will remove from the market companies that today do not want to invest in the responsible conduct of their business.

- Capitalisation: all companies with long-term development goals always are guided (not always publicly) by some kind of line, mission, or philosophy of movement. Even if without clear boundaries and formulations, it's a matter of time. An ESG agenda with an environmental component allows a company to publicly declare this advantageously. There are estimates that capitalisation of companies that meet ESG criteria is growing faster than all others.

We also must not forget about Russian ingenuity, which knows how to carefully replace one thing with another, evading the direct influence of regulators. Many Russian industrial companies quite rightly replace the concept of «ecology» with the word «safety». And you can't argue here since safety of operation of industrial equipment and people in the workplace is no less important and risky for the company than greenhouse gas emissions.

While setting the task of preliminary assessing the rate of a possible quota for a regional organisation subject to regulation, it is recommended to consider the following aspects:

1. The quota calculation formula for the first Russian region with approved quota, which is Sakhalin region, may retain its original methodology for other constituent entities of the Russian Federation [14]. Note that the methodology went through a public discussion stage when the regulator considered the comments of issuers. So, nothing prevents this methodology from being broadcast to all regions – those who wanted it, have already voiced their comments. If a different methodology for calculating quotas is established for each entity, then in each case the draft of this methodology will go through the stage of preliminary public approval and adjustments based on the comments of issuers. The public comment period window is only a few weeks; the main thing here is for the emission issuer to develop its own position in advance and at the same time promptly transmit comments to the regulator or the developer of the methodology [15].

2. Whether a company will be subject to quotas depends not only on greenhouse gas emissions, but also on the position of the constituent entity and the Government of the Russian Federation. However, now, it makes

sense to digitise the company's possible costs in case of assigning quotas to take into account upcoming risks in the budget.

3. In addition, the methodology for calculating quotas for greenhouse gas emissions does not specify an algorithm for accounting and distribution of quotas in the presence of a carbon footprint of a company in the territory of different constituent entities of the Russian Federation, for example, the possibility of offsetting the excess of quotas in one region with the accumulated units of quota fulfilment of another region within the framework of the activities of one and the same legal entity. Here, for strategic analysis, it is also better to consider the «worst» scenario, when it is not possible to use offsets.

4. If the quota regime will apply to all constituent entities of the Russian Federation, it may be necessary to proactively develop the company's own climate strategy, considering the estimated quota for the issuer. It should be noted that for 2022, more than a hundred well-known Russian companies have announced climate plans to reduce greenhouse gas emissions, which will require adjustments to their plans and strategies when quotas are applied to them. The costs of this additional work must also be considered if a climate strategy is adopted before quotas appear in the region. Perhaps now it is worth assigning to an official of the company the entire range of «green» competencies and assessing all the risks. This will make it possible to be prepared for a sharp «tightening» of carbon regulation, for example, for a short time frame for achieving carbon neutrality for the emitter.

5. If the quota regime is extended to the corresponding region of the company, it is advisable to implement previously planned measures to reduce greenhouse gas emissions after the quota has been determined. Due to the high base effect, quota fulfilment units can be immediately released, which can then be used to offset future quota overruns or, alternatively, sold. By the time quotas are extended to all regions, market indicators for their value will already make themselves felt, so there should be no problems with liquidity.

For development of the voluntary carbon market, we note the nuances:

1. An assessment of the need to implement climate projects should take into account not only the direct economic effect (sale of premium products, sale of issued carbon units, savings on emissions fines or reduction in fees for emissions



exceeding the quota) or image benefits, but also indirect benefits at a qualitative level, which now cannot be calculated with sufficient reliability (the ability not to lose the sales market in the future, retention of developing, ambitious employees, future tightening of fiscal policy by regulators, tax preferences and preferential financing in the future, tender passing scores, etc.).

2. In case of implementing a climate project with the voluntary release of carbon units [16], the latter can be used to offset the excess emissions over quotas or be sold to avoid double counting. That is, if a regional organisation subject of regulation issued carbon units and reduced emissions below the quota by forming quota fulfilment units, then the regulator will not credit both the CU and the QFU to the carbon account in the register. You will have to choose based on market conditions – which has greater liquidity and costs more [17]. If QFU is chosen, it is enough to implement the event without registering a climate project to save on registration fees – several million rubles for each climate project (validation plus verification of the climate project).

3. Before designing a climate event, it is worth making sure that it falls within the criteria of a climate project.

Regarding railway industry, we will briefly highlight the key areas of implementing the principles of the «green economy»:

1. Increasing the level of efficiency in resource use.
2. Reducing the negative impact on the environment.
3. Ensuring compliance of environmental activities with the current level of development of science and technology.
4. Reducing potential risks in the field of environmental protection and environmental safety when carrying out activities.
5. Improvement of the management system in the field of environmental protection and environmental safety.
6. Increasing the priority of environmental safety and environmental protection issues.
7. Improving the culture of environmental safety of production processes.

In general, consideration of the principles of sustainable development allows companies to minimise ESG risks: the risks of an irresponsible approach to the environment, social policy, and corporate governance. Underestimation of ESG

risks entails significant losses in various areas of the company's activities: these are reputational risks, weakening of the company's position in the market of transport and logistics services, decreased attractiveness for potential investors, including the implementation of «green» technologies and digital transformation, disruption of supply chains and technological lag from comparable companies on the world market.

Considering the leading position of the Russian Railways holding company in the country's transport system and the principles of sustainable development, the main directions for implementation of ESG criteria in the future until 2030 are:

- In terms of creating a «green economy» – reducing the negative impact on the environment through modernising infrastructure and introducing the best available technologies in environmental activities, as well as increasing the level of efficiency in resource use with gradual introduction of elements of a circular economy.
- In terms of social responsibility of the Russian Railways holding company – ensuring safety of train traffic, technological safety, reducing the frequency of accidents and environmental disasters, promoting the values and principles of a healthy lifestyle as an element of the corporate culture of JSC Russian Railways.
- In the field of corporate governance – achieving technological sovereignty in key areas of scientific and technological development, involving employees, clients and suppliers in activities to implement the principles of sustainable development.

CONCLUSIONS

There are currently 1800 laws regarding climate change [18]. The Russian climate agenda, as a component of sustainable development processes, is supported by the international obligations of the Russian Federation and two key Russian federal laws of 2021 and 2022. Despite numerous conflicting opinions about the need to involve Russian business in climate processes within the framework of sustainable development, there are clear signals that these are not temporary processes, but a sustainable paradigm of society. The best confirmation of this will be adoption by the state of a climate package of documents. As the result, the advantage in the corporate market will remain

with systemically important companies with a minimal carbon footprint. The driving force in this matter in the domestic market is JSC Russian Railways, as a leader in the implementation of ESG criteria.

Analysis of the results of the study might allow Russian companies making a consistent transition to a «green economy» to focus their climate position as carbon regulation in the Russian Federation becomes more stringent, and to be ready to quickly make strategically correct decisions.

REFERENCES

1. Through ESG to sustainable development [*Cherez ESG k ustoychivomu razvitiyu*]. [Electronic resource]: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1583552&archive=2021.10.21>. Last accessed 10.01.2023.

2. Energy Bulletin «Transboundary carbon regulation: challenges and opportunities», Analytical Centre under the Government of the Russian Federation, No. 98, July 2021. [Electronic resource]: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo/2021/бюллетень_№_98.pdf. Last accessed 10.01.2023.

3. Decree of the Government of the Russian Federation «On approval of the Rules for creating and maintaining a register of carbon units, as well as conducting transactions with carbon units in the register of carbon units», dated 30.04.22, No. 790. [Electronic resource]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205050004>. Last accessed 10.01.2023.

4. McKinsey & Company. [Electronic resource]: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>. Last accessed 10.01.2023.

5. Federal Law, dated 02.07.2021, No. 296-FZ «On limiting greenhouse gas emissions». [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/607142402>. Last accessed 10.01.2023.

6. Exchange trading at commodity auctions has started. [Electronic resource]: <https://carbonreg.ru/ru/news/2/>. Last accessed 10.01.2023.

7. Federal Law, dated 06.03.2022, No. 34-FZ «On conducting an experiment to limit greenhouse gas emissions in certain constituent entities of the Russian Federation». [Electronic resource]: <https://fzrf.su/zakon/2022-03-06-n-34-fz/st-1.php?ysclid=ln1oct2rxz737718612>. Last accessed 10.01.2023.

8. Decree of the Government of the Russian Federation, dated 24.03.2022, No. 455 «On approval of the Rules for verification of the results of climate projects implementation». [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/350066706>. Last accessed 10.01.2023.

9. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, dated June 30, 2015, No. 300 «On approval of methodological instructions and guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas emissions by organisations carrying out economic and other activities in the Russian Federation». [Electronic resource]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=264381>. Last accessed 10.01.2023.

10. Order of the Ministry of Economic Development of Russia, dated May 6, 2022, No. 247 «On approval of the procedure for classifying legal entities and individual entrepreneurs as regional regulated organizations as part of an experiment to limit greenhouse gas emissions in certain constituent entities of the Russian Federation». [Electronic resource]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=423475>. Last accessed 10.01.2023.

11. Presentation by VEB.RF «Use of project financing in conditions of limited capital – an example of responsible financing and ESG», November 2021. [Electronic resource]: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/533820921.pdf>. Last accessed 10.01.2023.

12. ESG assessment methodology. [Electronic resource]: <https://www.acra-ratings.ru/criteria/2623/>. Last accessed 10.01.2023.

13. Methodology for assigning non-credit ratings that assess a company's exposure to environmental and social business risks, as well as corporate governance risks (ESG ratings). [Electronic resource]: https://www.ranational.ru/sites/default/files/ESG%20Rating%20Methodology%20NRA_2020.pdf. Last accessed 10.01.2023.

14. Order of the Ministry of Economic Development of Russia, dated August 24, 2022, No. 452 «On approval of the methodology for determining projected quotas of greenhouse gas emissions as part of an experiment to limit greenhouse gas emissions in certain constituent entities of the Russian Federation». [Electronic resource]: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=432075>. Last accessed 10.01.2023.

15. Federal portal of draft regulatory legal documents. [Electronic resource]: <https://regulation.gov.ru/projects>. Last accessed 10.01.2023.

16. Order of the Government of the Russian Federation, dated 01.03.2022, No. 367-р «On determining an authorised legal entity performing the functions of an operator of the register of carbon units». [Electronic resource]: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203020028>. Last accessed 10.01.2023.

17. Decree of the Government of the Russian Federation, dated August 18, 2022, No. 1441 «On the rate of payment for exceeding the quota of greenhouse gas emissions as part of an experiment to limit greenhouse gas emissions in Sakhalin region». [Electronic resource]: <http://government.ru/docs/all/142679/>. Last accessed 10.01.2023.

18. Eskander, S. M. S. U., Fankhauser, S. Reduction in greenhouse gas emissions from national climate legislation. *Nature Climate Change*, 2020, Vol. 10, Iss. 8, pp. 750–756. DOI:10.1038/s41558-020-0831-z. ●

Information about the authors:

Lyovin, Boris A., D.Sc. (Eng), Professor, President of Russian University of Transport, Moscow, Russia, tu@miit.ru.
Tsvetkov, Victor Ya., D.Sc. (Eng), D.Sc. (Economics), Professor, deputy director for research of the Law Institute of the Russian University of Transport, Moscow, Russia, cvj2@mail.ru.
Isain, Nikolay V., Project Manager at the Division of the Strategic Development of JSC NIIAS, Moscow, Russia, n.isain@vnias.ru.
Okhotnikov, Andrey L., Deputy Head of the Information Technology Department, Head of the Division of the Strategic Development of JSC NIIAS, Moscow, Russia, a.okhotnikov@vnias.ru.

Article received 23.01.2023, approved 19.04.2023, accepted 15.05.2023.





Regulatory Framework for Ensuring Safe Operation of Railway Equipment Based on the Service Life of Load-Bearing Structures



Valery S. KOSSOV



Dmitry A. KNYAZEV



Nikolai F. KRASYUKOV



Nikolai A. MAKHUTOV



Mikhail M. GADENIN

*Valery S. Kossov*¹, *Dmitry A. Knyazev*², *Nikolai F. Krasnyukov*³,
*Nikolai A. Makhutov*⁴, *Mikhail M. Gadenin*⁵

^{1, 2, 3}JSC «Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKT»), Kolomna, Russia.

^{4, 5}Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia.

✉ ² knyazev-da@vnikti.com.

ABSTRACT

Switching the operation of railway equipment to life cycle contracts and confirming its safety compliance with industry technical regulations in the absence of a legislative framework for the recall of substandard products entails the need for a more thorough analysis of resource indicators of structural components of rolling stock and track superstructure. From this point of view, the state of the existing regulatory framework for confirming the strength and service life criteria of load-bearing elements of rolling stock and track, the influence of the regulatory «guillotine» and the general transition from the system of Soviet state standards GOSTs and strength rules to modern approaches of certification and differentiation of such concepts as «standard» and «supporting standard».

Trends in moving away from classical bench testing methods towards introduction of a resource-based approach with defectiveness

assessment are shown using examples of previously carried out research on safe operation of ER200 bogie frame and on the transition to domestic cassette bearings as part of import substitution, currently carried out for different types of rolling stock.

Based on the new methods and approaches, it is possible to consider longer periods of operation, reasonably assess the extension of service life, or introduce resource-restoring technology, ensuring further safe operation. As part of these new trends, a transition is being made to modern modelling methods for assessing product safety, concepts such as «virtual sensor» and «virtual train-track system» are being introduced. It is shown that a reasonable combination of full-scale operational tests and virtual digital modelling makes it possible to offer reliable estimates of service life and safety indicators at the design and operation stages in a short time.

Keywords: railway transport, strength, load, resource, rolling stock, full-scale bench and operational tests, virtual digital models and tests, safety confirmation.

For citation: Kossov, V. S., Knyazev, D. A., Krasnyukov, N. F., Makhmutov, N. A., Gadenin, M. M. Regulatory Framework for Ensuring Safe Operation of Railway Equipment Based on the Service Life of Load-Bearing Structures. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 254–262. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-10>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The introduction of the life cycle contracts to be used as basis of operation of railway equipment in the Russian Federation and the necessity to confirm the compliance of the safety of equipment with industry technical regulations in the absence of a legislative framework for the recall of faulty products entails the need for a more thorough analysis of resource indicators of structural components of rolling stock and track superstructure.

The development of a methodology for a comprehensive computational and experimental substantiation of reliability is carried out within the framework of an agreement between JSC Russian Railways and the Russian Academy of Sciences.

Of great importance are applied problems regarding the rolling stock which were solved by researchers from JSC VNIKTI, JSC VNIIZhT together with the Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences (IMASh RAS).

Since there is no law on the recall of substandard, faulty products, already at the stages of concluding life cycle contracts there is a need for resource analysis and further inclusion of these assessments in contracts and resource management process regarding operation of rolling stock and railway transport facilities through life cycle contracts. All this relates to the law on technical regulation,¹ from which technical regulations that set specific safety objectives organically follow.

¹. Federal Law «On technical regulation» № 184-FZ, dated December 27, 2002, 129 p. [Electronic resource]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/?ysclid=lnbusufwwa679963992. Last accessed 24.05.2023.

The concept of «risk» appears, assessed through a resource. In the standardisation law,² unfortunately, strength standards disappear.³

In this regard, JSC Russian Railways initiated research, during which JSC VNIKTI summarises industry experience in applying the strength standard rule [norm] and creates the basis for emergence of a new document, an information and technical directory, which is provided for by the law on standardization (Pic. 1) ³.

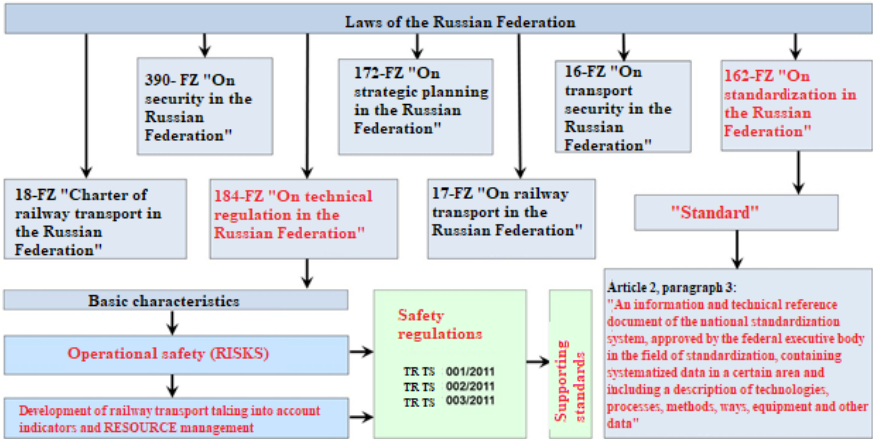
The objective of the research is to summarise the results of development of a methodology of comprehensive computational and experimental substantiation of reliability and of a legal and regulatory base for safe operation of rail equipment as for service life of load-bearing structures

RESULTS

Service life and safety must be confirmed based on calculations and tests using proven methods (Pic. 2). Also, it is necessary to be able to qualitatively, with an assessment of probability, calculate the service life at the design stage. This should be laid down during production regarding the technological base and tools and be supported at the operation stage by all methods of diagnostics and maintenance.

² Federal Law закон «On standardization in the Russian Federation» № 162-FZ, dated June 29, 2015, 74 p. [Electronic resource]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/?ysclid=lnbuhjtmn504679735. Last accessed 24.05.2023.

³ Standard rules [norms] for calculating and assessing the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and the impact on the track of the undercarriage of locomotives on 1520 mm gauge railways of the Ministry of Railways of the Russian Federation. Moscow, Ministry of Railways, 1998, 145 p.



Pic. 1. Structural diagram of the relationship between legislative and regulatory acts on transport safety and security [here and after pictures have been developed with participation of the authors].



Table 1

Analysis of the state of state standards [GOST] that support technical regulations for railway facilities subject to technical regulation (TRF), based on availability of reliability indicators and methods for assessing the service life of TRF

Technical regulations of the Customs Union	Supporting standards		TRF (quantity)		
	Technical requirements	Control methods			
TR TS 001/2011	173	167	Rolling stock (17)	Components of rolling stock (44)	–
TR TS 002/2011	98	116	Components of infrastructure (20)	Elements of components of infrastructure (54)	Components of high-speed rolling stock (67)
TR TS 003/2011	76	84	Components of infrastructure (30)	Elements of components of infrastructure (64)	
Total	347	367	67	162	67
	714		296		

In table 1, within the framework of existing approaches to certification and acceptance testing, the concepts of «standard» and «supporting standard» are highlighted. A supporting standard contains certification requirements. It is being implemented through the 710th decision of the Interstate Commission of the Customs Union.⁴ In total there have been developed about 900 standards, while only 24 of them concern reliability, 18 – strength and service life, and almost none concern methods and methodology. The regulatory «guillotine» cut off the strength standard rules [norms] and many state standards [GOST] that existed in ex-Soviet Union. Hence, a necessity to come back to those issues, which is what the joint work of JSC «VNIKTI» with IMASH RAS is aimed at.

Basic standards for testing and regarding strength and service life of railway equipment:

1. GOST 16504–81. System of state testing of products. Testing and quality control of products. Basic terms and definitions.

2. GOST R 53076–2008. Rail transport. Requirements for the strength of railway rolling stock bodies.

3. GOST 31373–2008. Wheel sets of locomotives and multiple-unit rolling stock. Calculations and strength tests.

4. GOST 31846–2012. Special rolling stock. Requirements for the strength of load-bearing structures and dynamic properties.

5. GOST R 55495–2013. Motorised rolling stock. Requirements for strength and dynamic properties.

6. GOST R 55513–2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties.

7. GOST R 55514–2013 Locomotives. Methodology of dynamic strength tests.

8. GOST 33211–2014. Cargo wagons. Requirements for strength and dynamic properties.

9. GOST 33788–2016. Cargo and passenger wagons. Test method for strength and dynamic properties.

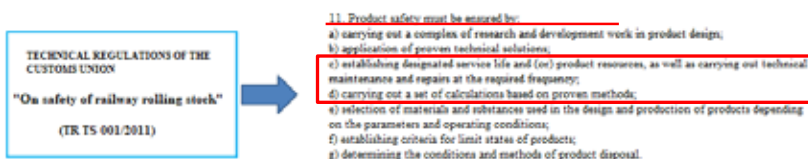
10. GOST 33272–2015. Safety of machines and equipment. Procedure for establishing and renewing assigned resources, service life and storage period. Basic provisions.

11. GOST R 57445–2017. Railway technical means. General requirements for residual life determination methods.

12. GOST R 15700.10–2018. Numerical modelling of physical processes. Determination of stress-strain state. Verification and validation of numerical models of complex structural elements in the elastic domain.

Any of these standards, if compared with previously existing strength standards³, is much shorter. The strength standard rules are a document of about 200 pages instead of 30–50 pages of standards. They provide only the main criterion relationships, but the entire methodological base is missing. Previously, the structure of industry was homogeneous, managed by the USSR Council of Ministers, but now, due to the emergence of competition among companies, the issue of calculation rules and comparison of calculations is becoming increasingly relevant. It is necessary for both the manufacturing plant employee, the

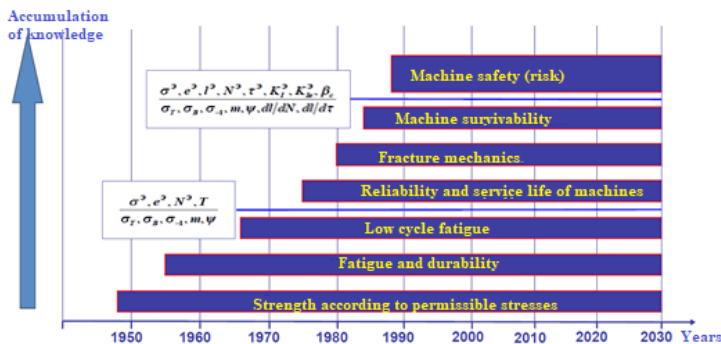
⁴ Decision of the Customs Union Commission «On the adoption of technical regulations of the Customs Union «On safety of railway rolling stock», «On safety of high-speed railway transport» and «On safety of railway transport infrastructure» No. 710, dated July 15, 2011, 82 p. [Electronic resource]: <https://www.alta.ru/tamdoc/11sr0710/?ysclid=lncutwnj2j999365223>. Last accessed 24.05.2023



Pic. 2. Initial provisions of TR TS 001/2011

[Translation of official text in Russian is for exemplification only].

Note: Technical Regulations of the Customs Union 001/2011 «On safety in railway transport» (TR TS 001/2011). Adopted by EEC decision No. 710 of July 15, 2011, 59 p. [Electronic resource]: https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standards/technicalregulations?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXdSAAZHy3Rpb24AAAABABJJaGFuZ2Vta2luVmlzdWVsbHkABXRoZW1IAAAAAQAcG93LWJsYWwRLXNob3ctcHRzYW5zLWxzWmVybWAhX19FT0ZlXw**&portal:componentId=abfaa8e6-70cc-47aa-8946-0fd2b2df47b3. Last accessed 24.05.2023.



Pic. 3. Current state and stages of development of scientific disciplines of strength, resource and safety.

scientist, and the operation employee of JSC Russian Railways to consider the issues of the life cycle and its provision according to approximately the same rules.

Thus, tests have now been completed on five cassette-type axle-box bearings, including three of Chinese manufacturers and two of domestic manufacturers. Positive test results have been obtained based on reproduction of 400 thousand km of mileage. Testing of cassette bearings on electric locomotives 2ES6 produced by Ural Locomotives LLC is currently underway, as well as tests of cassette-type bearings on cargo cars wagons which are almost completely equipped with domestic units and parts (inner and outer rings, fasteners, lubrication). In 2023, tests of cassette bearings for cargo cars with a load of 25 tf fully manufactured in Russia will be carried out, tests of bearings for high-speed domestic rolling stock will be tested through reproducing 600 thousand km of mileage, and bearings of the high-speed electric locomotive EP20 will be tested as well.

Based on the identified trends, methods will be developed that will allow analysing the resource at all stages of the life cycle.⁵

Pic. 3 presents the history [1] of development of the science on the strength of machine

structures, starting from the strength of materials, the development of its models, the theory of elasticity, to issues of survivability, safety, risks and assessment of these parameters.

Table 2 presents an assessment of strength and service life based on permissible stresses and safety factors. At the stages of design, preliminary design development, decisions on dimensions, and engineering vision of the project, such an assessment is necessary [2].

The resource should then be assessed. To do this, it is necessary to construct a fatigue curve with determination of the endurance limit and assessment of damageability [2] (Pic. 4). Calculation of the resource assumes accumulation of damage as the part is used and the destructive number of cycles is reached. Next, it is possible to proceed to estimating the resource in years of operation. But this is only at the stage of development of the resource approach.

The development of the approach is that defects also need to be assessed. There is no large wagon casting without defects. Pic. 5 shows an example of a fracture mechanics model with development of a crack-like defect, and corresponding estimates are given. Here elements of defect modelling, load studies, considering developments in the field of mechanics of a deformed body, fracture mechanics with an assessment of the number of cycles, mileage and conversion to years of operation are given (Table 3).

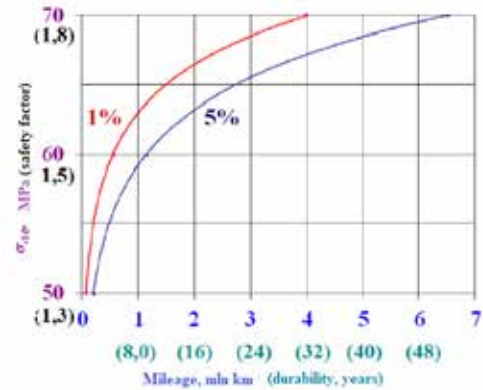
⁵ GOST 57445-2017. Railway technical means. General requirements for resource determination methods. Moscow, Standartinform publ., 2017, 26 p. [Electronic resource]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746291.pdf?ysclid=Incv2au9ff644715443>. Last accessed 24.05.2023.



Table 2

Strength conditions according to current standards

Rolling stock type	Static strength assessment as for permissible stresses		Fatigue resistance rating as for permissible safety factor n
	I mode	III mode	
Locomotives	$\sigma_a \leq [\sigma] = 0,90 \cdot \sigma$	$\sigma_a \leq [\sigma] = 0,55 \cdot \sigma$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_a + \psi \cdot \sigma_m} \geq 2$
Wagons		$\sigma_a \leq [\sigma] = 0,60 \cdot \sigma$	$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \cdot \sigma_{ac}} \geq 1,4 \dots 1,8$



Pic. 4. Assessment of the resource of the side frame of a cargo car at the design stage: 1%, 5% - damageability.

Pic. 6 shows the complex of works carried out on the frame of the ER200 bogie during the period when the issue of ensuring safe operation of the electric train was acute for 2–3 years before the introduction of Sapsan trains into operation. This work was successfully carried out by JSC VNIKTI together with JSC VNIIZhT and IMASh RAS. A histogram of operational load was generated, a calculation was carried out, the most loaded zones were identified, concentrators were installed, and the levels of residual stresses were determined. For the stated conditions, an estimate was made of the number of trips of the ER200 electric train depending on the magnitude of the residual stresses (Table 4). Subsequently, these bogie frames were constantly inspected, monitored, and promptly restored (repaired) or removed.

Switching to the resource approach, researchers have already started to move away from the classical approaches of material strength and fatigue curves with a horizontal right branch due to the fact that even with testing period comparable to forty years of operation and above, approaches based on unlimited endurance of the part do not work (Pic. 7). Then the right branch of the fatigue graph has a slope and enters the gigacycle fatigue zone. As an example of assessment, trips of Sapsan train on Moscow-St.

Petersburg route were studied. For this train, the service life according to specifications is set at 15 million km of mileage or 30 years of operation. The full loading cycle for the specified service life is the number of wheel revolutions (5×10^9). Such a volume of operating time, even in bench conditions, means years of testing with the existing technical capabilities. Over 65 years, JSC VNIKTI tested only about five samples of axles based on 10^8 , which made it possible to estimate the angle of inclination of the right branch of the fatigue curve [3]. And now, based on these developments, we can state about long periods of operation and reasonably assess the extension of service life or assign resource-restoring technology and ensure further safe operation.

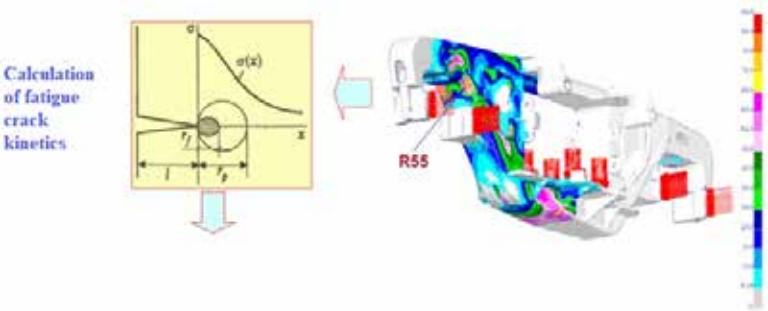
JSC VNIKTI together with IMASh RAS has developed a problem-oriented state standard⁵, which offers guidelines and shows the main directions of work and determines the requirements for calculating the resource. It states that, first of all, the issue of determining the load-bearing and power systems is important (Pic. 8). The resource is determined by all the features of operation, that is, it is necessary to solve a technical and economic problem: some objects must provide an absolute resource and can be safely operated, while others must be promptly removed, repaired, or disposed of. But in any case, the facility must operate reliably between scheduled repairs.

All complex computation programs have the concept of «virtual sensor». By placing it in any zone of interest, and this is, first, the zone of stress concentrations, the most loaded zone, at the virtual modelling stage we obtain a virtual load. This load can be converted into stress blocks, and by comparing them with the fatigue curves of materials or objects, parts, the service life can be assessed with the required accuracy. Sufficient accuracy with the required probability of non-destruction is ensured by comparing numerical virtual experiments with accumulated

Table 3

Dependence of resource on various defects in cast elements

List of factors under study	Resource		
	Number of cycles	Mileage	Years (mileage is assumed as 120 thous. km/year)
Reduced ductility of cast steel 20GL: – relative elongation 7...16 % instead of 18 %; – relative narrowing 8...19 % instead of 25 %	2,70x10 ⁹	3118	26
No heat treatment when welding casting defects within a radius of R55	279x10 ⁶	322	2,7
Presence of internal casting defects (gas pore, crack) in the R55 zone	13,8x10 ⁶	153	1,3

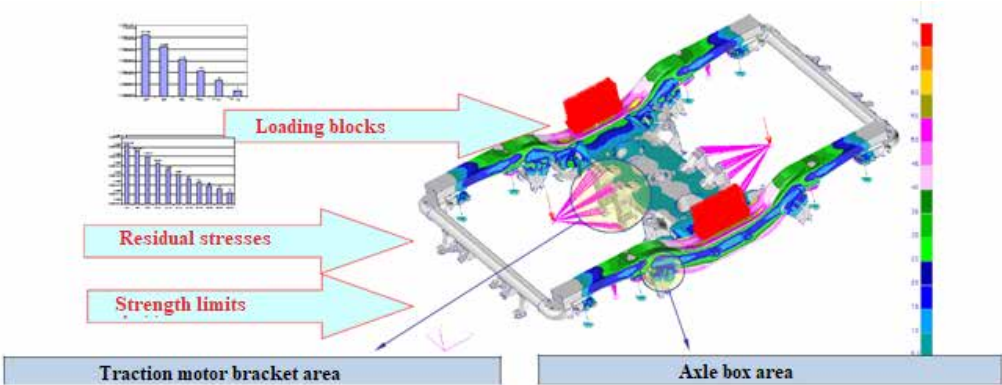


Pic. 5. Life study of the cast side frame of a cargo wagon bogie.

Table 4

Values of maximum residual stresses

Traction motor bracket area			Axle box area		
Residual stresses, MPa	Resource		Residual stresses, MPa	Resource	
	Number of trips	Years		Number of trips	Years
240	320	3,1	240	308	3,0
200	460	4,4	200	420	4,0
150	852	8,0	150	544	5,0



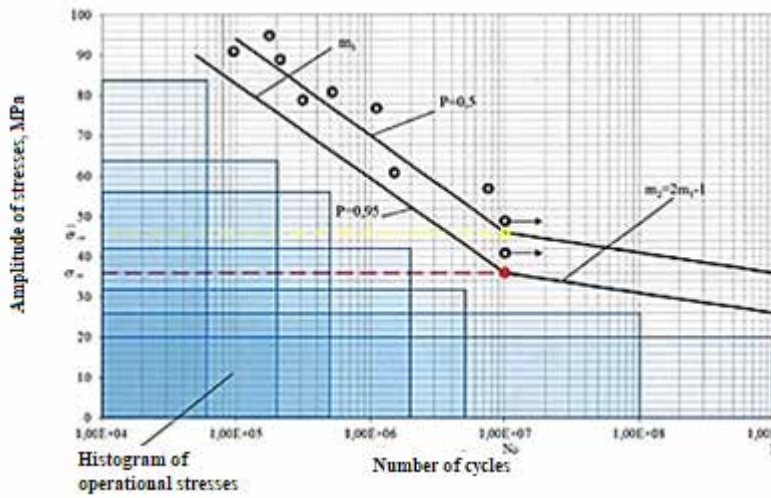
Pic. 6. Estimation of the residual life of ER200 bogie frames as for St. Petersburg–Moscow section.

experimental data based on the results of bench and train tests.

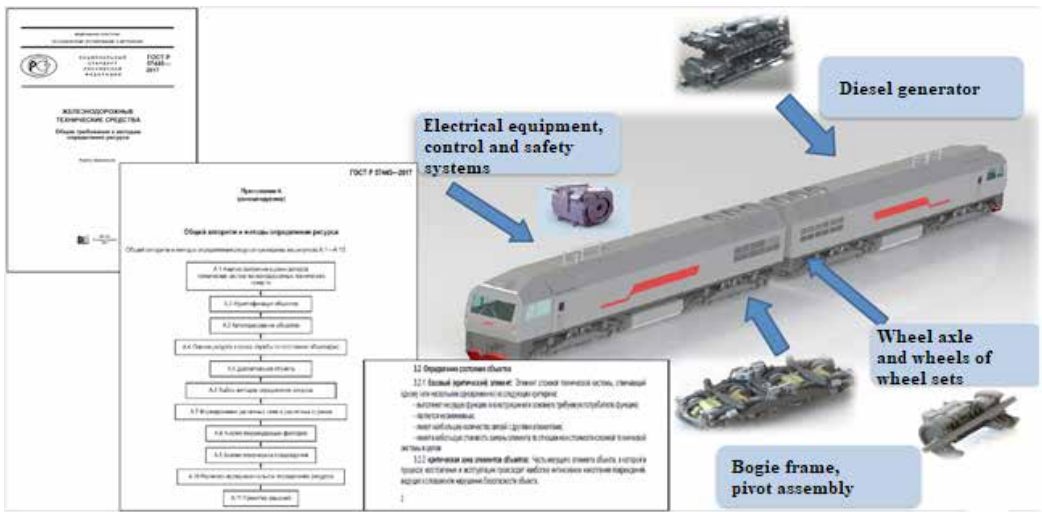
When modelling, along with the solid components of the rolling stock, finite element elastic models of the structures under study (bodies, frames, parts, traction drive, etc.) are created that sufficiently fully reflect the power flow of the supporting system or the transmission of traction force.

Pic. 9 shows a general view of the load blocks formed for computations and their development [4], obtained in model and full-scale experiments. The «train – track» interaction, combined with the impact of unevenness, deviations, track alignments, and wheel damage actually measured at the operating site, for example, the Eastern segment of the railway network, makes it possible to obtain the real load and achieve the

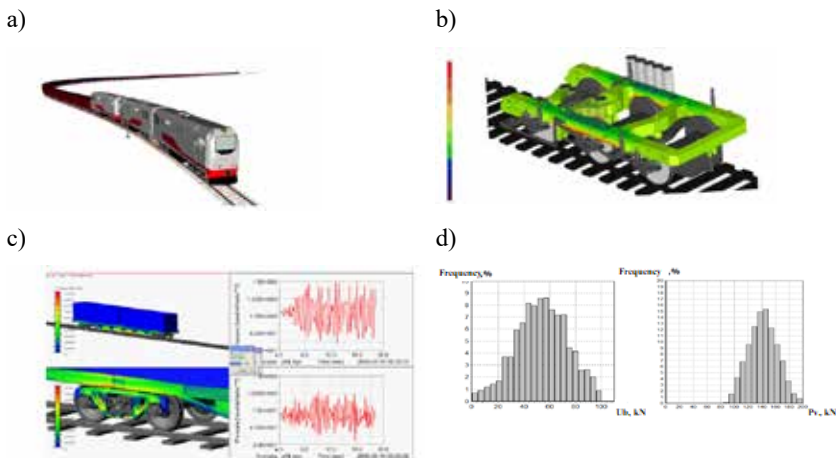




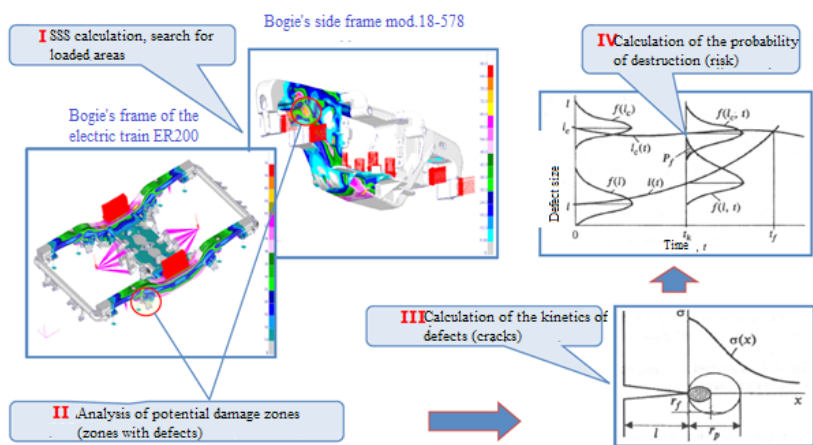
Pic. 7. An example of calculating the service life of a bogie frame sidewall: m_1 and m_2 – indicators of the slope angle of the fatigue curve; P – probability of destruction; N_0 , N^* – test bases; σ – endurance limits of the part.



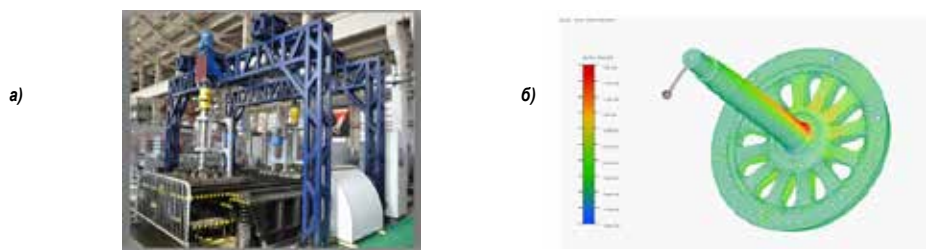
Pic. 8. Basic elements that determine the service life and operational safety of a locomotive.



Pic. 9. A schematic example of implementation of the approach using digital models to determine the operational load: a – solid-state model of a moving train; b – elastic FE model of a locomotive bogie; c – elastic FE model of a cargo car; d – distribution of lateral (Y_b) and vertical (P_v) forces from the wheels to the rails.



Pic. 10. Generalised scheme of risk analysis of load-bearing elements of rolling stock.



Pic. 11. Equipment for testing axles and wheels for fatigue by cyclically changing circular bending: a) general view of the full-scale stand; b) a virtual analogue of a «wheel-axle» test bench.

Table 5

Comparison of regulatory documents regarding testing base

Standard requirements in Europe		Standard requirements in Russia	
Test base	Regulatory documents	Test base	Regulatory documents
Confirmation of the endurance limit of axles on the base 10^7	DIN EN 13260	Confirmation of the endurance limit of axles on the base 10^7	GOST 33783 GOST 11018
Confirmation of the endurance limit of wheels on the base 10^7	DIN EN 13262	Confirmation of the endurance limit of wheels on the base 10^7	GOST 4835

required probability of estimating resource indicators.

In Pic. 10, two objects are considered: the sidewall of the cargo wagon bogie and the bogie frame of the ER200 electric train. This approach is now being actively implemented at JSC VNIKTI using the above models and integrating them into digital technology.

In 2023 and further on, it would be advisable for JSC VNIKTI to focus on identifying the deep relationship between the finite element (FE), truly mechanistic approach and statistical models, including neural networks. Mechanical models themselves are a source of big data, but they need to be compared and adjusted in accordance with operational data [5].

Pic. 11 shows an example of testing axles and wheels and how it is possible to develop virtual stands and tests [6, pp. 61–65].

Table 5 shows estimates of the number of cycles before failure and a comparison of the results obtained with the regulatory framework.

CONCLUSIONS

Based on the foregoing, we can conclude that virtual testing of railway equipment through numerical modelling (development and research of adequate digital models) is important for traffic safety, allowing to achieve the goals [7, pp 69–72; 8, pp. 27–29] of:

- Assessment of running and dynamic qualities, strength, service life and safety of rolling stock (RS),
- Study of the characteristics and performance of the track.
- Study of the interaction of RS, tracks, their load.



Besides, virtual tests help solve the following problems:

- Study of the stress-strain state of structures of large-sized and heavily loaded objects.
- Study of stress concentration (including using virtual sensors) in structural elements, welded and cast parts.
- Modelling and simulation of extreme and emergency conditions and types of object loading.
- Modelling of joint and individual components and types of impacts for complexly loaded objects (mechanical, thermal, etc.).

Methods of using software:

- Selection and justification of models depending on formulation of the problem (statics, kinematics, dynamics) and the solution area.
- Creation of finite element 3D models of the objects under study.
- Fine-tuning of FE models taking into account the design features of the object (rods, plates, shells, etc.).
- Selection and justification of the FE mesh.
- Confirmation of the model's compliance with the task and study of the limits of applicability of the solution.
- Verification and validation of the model and results.

REFERENCES

- 1 Oganyan, E. S., Volokhov, G. M. Calculations and strength tests of locomotive load-bearing structures [Raschety i ispytaniya na prochnost nesushchikh konstruktssii lokomotivov]. Moscow, TMC for railway education, 2013, 326 p. ISBN: 978-5-89035-618-5.
2. Makhutov, N. A., Gapanovich, V. A., Kossov, V. S., Oganyan, E. S., Krasnyukov, N. F., Volokhov, G. M. Methods for determining the service life and cyclic strength of locomotive underframe structures. Transport: nauka, tekhnika, upravlenie, 2016, Iss. 10, pp. 3–12. [Electronic resource]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27180774&ysclid=lnbggnup2j283492649>. Last accessed 17.04.2023.
3. Volokhov, G. M., Oguenko, V. V., Timakov, M. V. Linear approximation of the fatigue curve of full-scale axles of rolling stock wheel sets in the gigacycle range [Lineinaya approksimatsiya krivoi ustalosti naturnykh osei kolesnykh par

podvizhnogo sostava v gigatsiklovom diapazone]. Rolling stock of XXI century: ideas, requirements, projects. Abstracts of VIII International scientific-technical conference (St. Petersburg, July 3–7, 2013). St. Petersburg, PGUPS publ., 2013, pp. 38–41. [Electronic resource]: <https://drive.google.com/file/d/13Q9KxaPjpagYS90tkclunpyeSGEh4uQ1/view> [full text of materials of the conference]. Last accessed 17.04.2023.

4. Volokhov, G. M., Knyazev, D. A., Timakov, M. V. Using a generated block of wheel pair loads of high-speed rolling stock when calculating axle survivability [Ispolzovanie generirovannogo bloka nagruzok kolesnoi pary vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava pri raschete zhivuchesti osi]. Rolling stock of XXI century: ideas, requirements, projects. Materials of XII International scientific-practical conference (St. Petersburg, July 5–9, 2017). St. Petersburg, PGUPS publ., 2017, 190 p. pp. 128–130. ISBN 978-5-7641-0908-4. [Electronic resource]: <https://drive.google.com/file/d/1xL6Jl2sKUTOLcL0G04YKxY6kLR3bHD4E/view> [full text of materials of the conference]. Last accessed 17.04.2023.

5. Oganyan, E. S., Volokhov, G. M., Gasyuk, A. S., Fazliakhmetov, D. M., Muravlev, E. V. Safe operation of locomotives based on the service life of their basic parts. Bezopasnost truda v promyshlennosti, 2017, Iss. 6, pp. 54–57. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

6. Volokhov, G. M., Knyazev, D. A., Timakov, M. V. Simulation of crack growth on the hollow axle of a motor wheel set of high-speed rolling stock [Modelirovanie rosta treshchiny na polnoi osi motornoj kolesnoi pary vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava]. Locomotives. Transport and technological complexes. XXI Century. Collection of materials of V International scientific-technical conference dedicated to the 180th anniversary of Russian railways (St. Petersburg, November 14–16, 2017). St. Petersburg, PGUPS publ., 2017, 455 p., pp. 61–65. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

7. Oganyan, E. S., Volokhov, G. M., Gadzhimetov, G. I. On the issue of the procedure for updating the fleet and extending the service life of operating locomotives in the light of the requirements of TR TS 001/2011 [K voprosu o poryadke obnoveniya parka i prodleniya srokov sluzhny ekspluatituyushchikhsya lokomotivov v svete trebovaniy TR TS 001/2011]. Locomotives. Transport and technological complexes. XXI Century. Proceedings of V International scientific and technical conference dedicated to the 180th anniversary of Russian railways (St. Petersburg, November 14–16, 2017). St. Petersburg, PGUPS publ., 2017, 455 p., pp. 69–72. ISBN: 978-5-7641-1098-1.

8. Volokhov, G. M., Ovechnikov, M. N., Knyazev, D. A., Timakov, M. V. Simulation of crack growth in railway rolling stock axles [Modelirovanie rosta treshchiny v osyakh zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava]. Computer modelling in railway transport: dynamics, strength, wear. IV scientific and technical seminar (Bryansk, April 3–4, 2018). Bryansk, BSTU publ., 2018, 78 p., pp. 27–29. ISBN: 978-5-906967-87-9. ●

Information about the authors:

Kossov, Valery S., D.Sc. (Eng), Professor, General Director of JSC «Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKT»), Kolomna, Russia, vskossov@icloud.com.

Knyazev, Dmitry A., Ph.D. (Eng), Deputy Head of the Department of JSC «Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKT»), Kolomna, Russia, knyazev-da@vnikti.com.

Krasnyukov, Nikolai F., Ph.D. (Eng), Leading Researcher of JSC «Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock» (JSC «VNIKT»), Kolomna, Russia, timakov-mv@vnikti.com.

Makhutov, Nikolai A., D.Sc. (Eng), Professor, Corresponding member of RAS, Senior Researcher at the Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia, kei51@mail.ru.

Gadenin, Mikhail M., D.Sc. (Eng), Senior Researcher at the Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia, safety@imash.ru.

Article received 06.03.2023, approved 25.05.2023, accepted 19.06.2023.



Risk Management for the Safe Use of Highly Automated Vehicles in a Metropolis: Systems and Legal Analysis



Alexander I. ZEMLIN



Maria A. MATVEEVA



Eugenia V. GOTS

Alexander I. Zemlin¹, Maria A. Matveeva², Eugenia V. Gots³

¹ Russian University of Transport, Scientific Expert Council of the Center for Security Studies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

^{2,3} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

✉ ¹ zemlin.aldr@yandex.ru.

¹ ORCID ID 0000-0001-8988-8517, Web of Science Researcher ID T-1126-2018, Scopus Author ID: 57208147055, Russian Science Citation Index AuthorID 326650, SPIN-code 1741-0737.

² ORCID ID 0000-0002-3297-4833, Web of Science Researcher ID S-2705-2018, Scopus Author ID 57211385696, Russian Science Citation Index AuthorID 793762, SPIN-code: 9522-1595.

³ ORCID ID 0000-0001-7623-6798, Russian Science Citation Index Author ID: 784499, SPIN code: 1349-1967.

ABSTRACT

The article presents the results of a scientific study of current issues of risk management associated with ensuring safe operation of unmanned vehicles, obtained by the authors as a result of implementation of the second stage of a scientific project supported by the Russian Science Foundation. The conclusions presented in the article are based on the results of a study of legal and organisational problems of ensuring the safe use of unmanned vehicles in a metropolis, carried out during the first stage of the project.

The study confirmed the authors' assumption that solving the problem of ensuring the safe use of unmanned vehicles is possible based on scientific research into the risks arising during their

operation. It is substantiated that identification, differentiation, monitoring of risks determined by appearance of unmanned vehicles on highways is a necessary condition for development of a scientifically based system of legal measures of general and private prevention, including measures of legal liability for relevant offenses, based on categorisation of risks and threats of violation of mandatory requirements adopted to ensure transport safety and traffic management using this type of vehicle.

The fundamental provisions are analysed and comprehended underlying the application of the risk-based approach in homogeneous and single-type social relations.

Keywords: transport law, legislation, unmanned vehicles, transport safety, risk, risk-based approach.

Financial support: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 22-28-20334 «Legal means of ensuring safety of the use of unmanned vehicles in a metropolis», <https://rscf.ru/project/22-28-20334/>.

For citation: Zemlin, A. I., Matveeva, M. A., Gots, E. V. Risk Management for the Safe Use of Highly Automated Vehicles in a Metropolis: Systems and Legal Analysis. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 263–270. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-11>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

We should agree with the statement that human social activity and emerging activity practices are now increasingly associated with the widest introduction into the practice of social life and the use of high technologies and highly mobile or automated technical means [1, p. 62]. These processes are fully visualised in the functioning of the transport industry, which provides logistics processes necessary for functioning of other sectors of the economy, ensuring the connectivity of the country's territory [2, p. 45], defence capability and national security of the state [3, p. 101].

The introduction of innovative technologies is carried out against the backdrop of growth and the emergence of qualitatively new challenges and threats of both a technological, military, and social nature [2, p. 163]. We must agree with the opinion that the global civilisational «challenges that humanity faces are accompanied by a lack of ideas regarding its further movement. This fully applies to such a phenomenon as law» [4, p. 5]. A significant number of representatives of Russian legal science come to similar conclusions, the subject of their research is in various branches of legal knowledge [5, p. 18; 6, p. 9; 7, p. 5; 8, p. 278], which, in our opinion, only confirms the general nature of the statement according to which the use of high technologies naturally entails significant problems for legal science and the practice of law enforcement.

In the works of representatives of transport legal science, it has been repeatedly and quite thoroughly stated that development and increasingly widespread use of an automated driving system, commissioning of innovative vehicles is aimed, first of all, at solving a whole complex of problems that are significant for the modern economy, such as reducing transport costs by reducing the driver's wage fund and related costs, optimising the costs of maintenance, depreciation, repair and insurance of vehicles, saving fuel due to automatic driving style [9, p. 18], ensuring transport safety by minimising the influence of the human factor on road accidents [10, p. 71] etc.

However, there is also an «other side of the coin»: the introduction of highly automated cars

into the country's transport complex poses a number of serious challenges to the law as a public regulator [11, p. 15], which undoubtedly requires their consideration in the rule-making process [12, p. 131].

In this regard, it is necessary to critically evaluate the degree of compliance of adopted legal acts with the needs of practice, the principles of consistency and mutual conformity. Solving this problem will make it possible to formulate directions for further research and develop proposals for improving the system of legal regulation of relations related to introduction of unmanned vehicles, which can help solve problems not only of a theoretical but also of a practical nature that arose in the process of introducing fully automated cars into the Russian transport system.

The use of a risk-based approach can help solve this problem. This approach is based on a program-targeted approach and has become widespread in various spheres of public life, for example, in project activities, financial activity [13, p. 16; 14, p. 34]; budgeting and financial activities of the state [15, p. 48–49]; business processes [16, p. 39]; public administration and state control (supervision) [17, p. 54]; countering terrorism [18, p. 13] and corruption [19, p. 52; 20, p. 50]; preventing the spread of infectious diseases [1, p. 7; 21, p. 17; 22, p. 456; 23, p. 161] etc.

Understanding the significance of problems associated with typology, visualisation, monitoring and subsequent risk management in transport is demonstrated by a number of Russian and foreign researchers.

Thus, there is a justifiable interest in classification of risks and threats to information security that arise during the use of unmanned aircraft [5, p. 44], considering current issues of providing criminal legal protection in this area [24, p. 119]. It is noted that of particular importance is resolution of the issue of liability for external interference in the process of control and operation of the automated driving system of an unmanned vehicle.

There are attempts being made that deserve attention and support to form a conceptual basis for risk management in transport as a special type of management activity that has a staged

and systemic nature [16; 25, p. 34; 26. p. 19 and onwards].

The need to consider the probable risks of the safe use of transport facilities is considered in the interests of introducing a life cycle contract in the long-distance passenger complex [27, p. 88].

Specialists pay special attention to the study of compliance with humanitarian law when using various unmanned systems [28, p. 218; 8, p. 277], as well as monitoring the risks of their use in various environmental conditions [29, p. 118; 3, p. 98].

Foreign experts are actively exploring the risks associated with increasing costs caused by road congestion due to introduction of unmanned vehicle fleets, which significantly affect urban mobility [30], focusing special attention on problems associated with risks for high-quality urban spaces and active mobility of the population, noting that despite the expected future adoption of autonomous vehicles in cities, there are very few studies analysing the challenges that faces urban planning [31].

There are works of interest devoted to predicting the risk of road accidents considering various factors, including the risks associated with the increasingly widespread use of driverless cars, considering the issues of assessing the risk of an accident based on the history of driving trajectories, driving events and records of influence [32].

It is also not unreasonable to note the need to develop a methodology for assessing the risks of road accidents involving unmanned vehicles, connected and automated vehicles in general. Foreign experts propose to proceed from the fact that automated vehicles are transforming road transport, and as part of this transformation, vehicle insurers are one of the key stakeholders [33].

Analysis of the results of the impressive research activity of representatives of various scientific fields and schools, specialists in the field of transport, allows us to draw a conclusion about the relevance and significance of the problem that determined the purpose of the study, as well as to determine the range of insufficiently studied issues, which allows us to formulate research tasks and determine the

research methodology, formulate conclusions and justify the authors' conclusions, the implementation of which, in our opinion, can help minimise the risks to the safe use of highly automated vehicles.

The objective of the study, an important stage of which is outlined in the article, is to develop conceptual proposals for improving the system of legal regulation of risk management for the safe use of highly automated vehicles.

RESULTS

Initial Hypotheses

Using previously obtained results from the scientific literature, the authors proceeded in the research process from the hypothesis that the high degree of social, economic, and defence significance of the transport system for Russia [17, p. 52], vulnerability of elements of the transport complex to acts of illegal interference [34; 10, p. 71], strictly determines the need for in-depth scientific study of the sources of origin and typology of risks and possible threats to safe functioning of transport [10, p. 74], developing on this basis a system of legal regulation of transport relations using the tools of public legal regulation.

Previously, the authors also substantiated the thesis [35; 29], according to which the relationship between the emergence of innovative transport and the importance of legal support for the processes of their implementation and use [36, p. 263], the need for their legal regulation in the interests of ensuring transport safety in general [2, p. 46], minimising the risks associated with the increasingly widespread use of vehicles [37, p. 4], including those equipped with an automated driving system [38, p. 29], should be recognised as having a natural character and completely scientifically substantiated [35; 39].

At the same time, the results of a systems, legal and formal-dogmatic analysis of domestic normative legal acts and their projects indicate the incomplete adequacy of measures taken to resolve the relations that arise during implementation of innovative technology [38, p. 91]. We also previously substantiated the statement that rule-making activity in this direction is carried out with a significant delay



and with an insufficient degree of systematicity [38, p. 94].

Important for this study is the conclusion that it is necessary to use the potential of legislation on technical regulation, which should be considered precisely as the legal regulation of relations in the field of establishing, applying and fulfilling mandatory requirements for products, production, construction, installation, commissioning, operation and disposal, as well as in the field of application on a voluntary basis of requirements for these objects, and legal regulation of relations in the field of conformity assessment [34; 40, p. 35].

The authors substantiate the need and relevance from the point of view of social practice, feasibility and validity in the context of legal theory of using a risk-based approach to develop legal measures in the interests of ensuring safety of the use of unmanned vehicles, and therefore the study uses a historical and legal approach and tools of legal hermeneutics, methodology of formal-dogmatic and systemic approaches.

The results obtained in the process of research work allow us to assert with a sufficient degree of certainty that the high demand and potential applicability of the risk-based approach in various areas of public life is completely justified theoretically and supported by the needs of practice, since a scientifically sound and effectively functioning system of risk assessment and management in that or other area allows us to timely identify risk factors and take adequate measures of general and specific prevention to completely eliminate them or, at least, minimize them to an acceptable level that is permissible for normal functioning of the system.

The results of historical, semantic, semiotic analysis, accessible for study and appearing to be quite solid, obtained by numerous adherents of decision theory and game theory, free, in our opinion, the authors from the need for a detailed consideration of the category «risk», homogeneous and derivative terms and concepts, as well as the phenomena they designate within the framework of hermeneutics and epistemology.

At the same time, it should be borne in mind that it is precisely identification of common, coinciding in all concepts of the risk-oriented

approach in various fields of activity that allows us to isolate the typical essential features of the phenomenon we are studying, which are of fundamental importance. The need for this kind of research is seen in the importance of defining conceptual approaches based on which it is supposed to formulate the legal and organisational basis for applying a risk-based approach to identify the degree (measure) of threats to safety of the use of unmanned vehicles in the interests of subsequent development of management decisions to minimise them.

Risk-Based Approach to Organisation of State Control (Supervision)

Within the framework of a systemic legal study of the risks of the safe use of highly automated (unmanned) vehicles, the most significant for comparative research in connection with the possible applicability of experience are, in our opinion, legal foundations of a risk-based approach in a number of areas, which include, first of all, legislation on state control (supervision).

It should, of course, be considered that long before implementation of the risk-oriented approach to organisation of state control and supervision, the risk management system was used in customs and tax control, however, both fundamental and procedural aspects of application of this approach were found most fully in the legislation on state control (supervision).

Probably, the concept of a risk-oriented approach in state control (supervision) can be considered homogeneous for a risk-oriented approach to identify the degree (measure) of threats to safety of the use of unmanned vehicles, which determines the significance of the results of the study of the system of legal regulation of control over compliance with mandatory requirements proposed below. To better update the stated approach in relation to the subject of the study, the analysis will be carried out considering the specifics of control (supervisory) activities carried out in order to ensure transport security.

According to p. 2 of Art. 1 of Federal Law of July 31, 2020, No. 248-FZ «On state control (supervision) and municipal control in the Russian

Federation» (hereinafter also referred to as the Control Law) state control (supervision), municipal control should be aimed at achieving socially significant results related to minimising the risk of harm (damage) to legally protected values caused by violations of mandatory requirements. Thus, an analysis of the legalised purpose of state control indicates that the category «risk» has an essential meaning that determines both the purpose and the method of exercising control.

Despite the establishment of general conditions for implementation of a risk management system at the legislative level in the provisions of Chapter 5 of the Control Law, the legal regulation of risk management in transport as a type of management activity is fragmented. In addition, there is no general theoretical and legal model of risk management in transport, which would serve as a conceptual basis for building appropriate systems on specific modes of transport, corresponding to organization of control (supervisory) activities of Rostransnadzor [Federal Agency of Transport Supervision], taking into account its new powers and the risks, which significantly increased quantitatively and changed in content, for ensuring safety both for the Russian transport system as a whole and for individual modes of transport.

Legal Risk management Mechanisms for Modes of Transport

Some legal mechanisms for risk management have been formed and implemented in certain modes of transport.

Thus, in railway transport the Interstate standard GOST 33433–2015 «Functional safety» is in force. Risk management in railway transport»,¹ in which risk management is understood as coordinated activities aimed at managing and directing an enterprise in relation to risks (clause 3.33). The risk management process includes the following stages: defining the scope; definition of risk criterion; risk identification; frequency analysis; impact analysis; determining the level of risk; risk assessment; risk treatment; monitoring and review of risk (clause 5.1).

¹ Put into effect by Order of Rosstandart dated December 4, 2015 No. 2108-st.

There are a number of standards in force in air transport, in particular, the National Standard GOST R 55846–2013 «Air transport. Aviation safety management system. Acceptable risk. Principles and methods for determining acceptable risk for government and service providers».² Risk management in air transport is a process similar to safety management, in the highly specialized direction of ensuring safety based on measuring the significance of risks, reducing the severity of consequences from the impact of risk factors on the system and avoiding the system from risk factors (clause 3.1.9).

It should also be noted that the basis of various risk management concepts is the provisions of the following GOST [state standards]: GOST R ISO 31000–2010 «Risk Management. Principles and guidance», approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 21, 2010, No. 883-st; GOST R ISO 31010–2011 «Risk management. Risk assessment methods», approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 1, 2011, No. 680-st; GOST 33433–2015. Interstate standard. Functional security. Risk management in railway transport, approved by Order of Rosstandart dated December 4, 2015, No. 2108-st, etc., at the same time, the study of local risk management models indicates the absence of a unified conceptual and category-conceptual approach to the issue of risk management in transport. In particular, the concepts developed by corporations³ use such concepts as: risk factor, risk indicator, hazards, sources of risk events, etc.

The risk management concept formulated in railway transport has a staged nature. Thus, the risk management process in railway transport consists of the following stages: a) risk identification; b) risk analysis and assessment;

² Approved by Order of Rosstandart dated November 22, 2013 No. 1878-st.

³ Order of JSC Russian Railways dated January 13, 2020 No. 18/r «On approval of the Methodology for assessing decision-making criteria when developing measures in cases of violation of traffic safety based on an analysis of risks in the field of traffic safety and reducing the severity of the consequences of road accidents at railway crossings».



c) impact on identified risks; d) monitoring and review; f) exchange of information and consultation (clause 2.10. MR).

At the same time, the methodology for identifying risks also involves analyzing the causes (risk factors, sources) of a risk event. Risk factors are understood as internal or external factors that, individually or in combination with other factors, can lead to risk realization. In addition, at the stage of risk analysis and assessment, for the purpose of further monitoring and review of risks, risk owners develop key indicators for identified risks (KIR) (clause 4.7.1. MR). KIR are used to provide early warning of the increasing likelihood of risk occurrence and take preventive measures to address the risk or recognize the fact of risk occurrence and take measures to minimize the consequences. They are not a description of the risk but serve as an indicator for considering the need to change current activities to address the risk.

Opportunities and Goals of Applying a Risk-Based Approach to Driving Unmanned Vehicles

As a result of the data obtained, we believe it is possible to assert that the use of the widely used risk-oriented approach seems to be the most adequate way to identify the degree (measure) of threats to safety of the use of unmanned vehicles for the purpose of subsequently developing legal measures and making management decisions in the interests of minimising them.

This approach allows for monitoring and visualisation of risks, their differentiation, which is the basis for development and subsequent implementation of measures, including those of a public law (administrative law) and private law (civil law) nature, aimed at preventing and eliminating or minimizing to an acceptable level the risks and safety threats of using unmanned vehicles in a metropolis.

We can conclude that the analysis of the fundamentals of minimising the risks of the safe use of unmanned vehicles involves identifying a set of principles for construction and operation of a system for managing these risks.

Construction of a risk management system associated with admission to operation of the subsequent use of unmanned vehicles, in addition to the general principle of consistency, according

to which management of this category of risks is considered as a component of more complex systems of specific significance, must have a certain structure, the property of adaptability, dynamism, sustainability, etc. It should be built on the basis of special principles, including scientific principles; comprehensiveness; objectivity; concreteness (situational), etc.

Brief Analysis of the Requirements of Private Principles: Differentiation and Legal Certainty

Considering the principle of differentiation, in our opinion, implies the need to typologize risks according to the degree of their significance for safety of using unmanned vehicles, identifying the degree of influence of the corresponding threats on road safety involving unmanned vehicles. Our highlighting of this principle is largely due to its special significance for resolving issues related to a comprehensive analysis of factors affecting safety of operating unmanned vehicles in megacities.

Legal certainty as a principle for constructing a risk management system associated with admission to operation of the subsequent use of unmanned vehicles presupposes the need for a clear and fairly rigorous regulatory legal settlement of all social relations arising in this case [11, p. 16; 12, p. 118;]. We are talking about the need to unambiguously establish in positive law procedures for identifying risk factors that arise in the process of admission to operation, operation of unmanned vehicles, risk monitoring, liability for relevant offenses, etc.

CONCLUSIONS

The results of the study made it possible to confirm the high degree of practical applicability and usefulness of the risk-based approach to minimise the threats that arise during the process of admission to operation and operation of unmanned vehicles.

The formation of the latest concept of risk management in transport should be preceded by work on development of a general theoretical and legal model for managing risks arising in the process of admission to operation and operation of unmanned vehicles.

A critical understanding of paradigmatic foundations of the application of a risk-based approach in various spheres of social production

and socio-economic relations made it possible to determine the system and partly the structure, to formulate the principles of constructing a risk management system associated with admission to operation and the subsequent use of unmanned vehicles.

Legalization in positive Russian law, the practice of the activities of transport management bodies and subjects of transport relations of the proposals formulated based on the results of the study will allow, by optimising the risk management system and the integrated use of legal means, to minimise the risks of operating unmanned vehicles on public roads, which has not only scientific implications, but also applied significance for ensuring the efficiency and safety of their operation, can contribute to innovative development of the transport system in the context of ensuring development of the Russian economy, achieving national goals and strategic positioning of the Russian Federation in the modern world.

The author's conclusions presented in this article do not pretend to be complete and final, but, in our opinion, can serve as the basis for both scientific discussion and further research into the problems of legal support for the safe use of unmanned vehicles.

REFERENCES

1. Gavrilov, S. O., Glebov, I. N., Chukin, S. G. [et al.] Law at the point of bifurcation: discussion of a conceptual study of military problems of international law [Pravo v tochke bifurkatsii: obsuzhdenie kontseptualnogo issledovaniya voennykh problem mezhdunarodnogo prava] (Round table discussion based on materials from Chapter 6 «Military problems of international law» volume III of the monograph «Military Law»). Gosudarstvo i pravo, 2022, Iss. 12, pp. 59–67. DOI 10.31857/S1026945202233012.

2. Bazhina, M. A. Main trends in development of legal regulation of transportation in the context of digitalization. Yurist, 2021, Iss. 11, pp. 44–50. DOI: 10.18572/1812-3929-2021-11-44-50.

3. Koryakin, V. M. Wartime transport legislation: problem statement [Transportnoe zakonodatelstvo voennogo vremeni: postanovka problemy]. Public legal problems of transport law: Proceedings of the Fifth International Transport Legal Forum. Eds.: A. A. Chebotareva, V. E. Chebotareva, L. M. Maleshina. Moscow, Law Institute of RUT (MIIT) publ., 2023, 326 p., pp. 96–106. EDN: QOZQPP.

4. Savenkov, A. N. The global crisis of our time as a subject of legal philosophy [Globalniy krizis sovremennosti kak predmet filosofii prava]. Gosudarstvo i pravo, 2019, Iss. 4, pp. 5–19. EDN: ZHEIRF.

5. Viksnin, I. I., Malikov, S. V., Chuchaev, A. I. Safety of unmanned aerial vehicles: informational, functional and criminal legal aspects: monograph [Bezopasnost bespilotnykh vozдушnykh sudov: informatsionnie, funktsionalnie

i ugolovno-pravovie aspekty: monografiya]. Ed. by A. I. Chuchaev. Moscow, LLC Law firm Contract, 2022, 240 p. ISBN 978-5-6047798-0-4.

6. Sinitsyn, S. A. Civil Law in modern Socio-Economic Conditions. Journal of Russian Law, 2021, Iss. 25, Iss. 1, pp. 8–15. DOI: 10.12737/jrl.2021.002.

7. Khabriyeva, T. Ya. Law Facing the Challenges of Digital Reality. Journal of Russian Law, 2018, Iss. 9 (261), pp. 5–16. DOI: 10.12737/art_2018_9_1.

8. Kholikov, I. V. Some problematic issues of international legal regulation of the use of unmanned maritime systems for military purposes [Nekotore problemnie voprosy mezhdunarodno-pravovoi reglamentatsii ispolzovaniya bespilotnykh morskikh sistem v voennykh tselyakh]. Voennoe pravo, 2019, Iss. 6 (58), pp. 276–282. EDN: WSJKKB.

9. Zhdanov, K. V., Kholikov, I. V. Disease caused by the Ebola virus: from theory to practice. Journal Infectology, 2015, Vol. 7, Iss. 1, pp. 5–17. EDN: TQQPRL.

10. Kharlamova Y., Pishchelko A., Zemlin, A. Problems of Realization of Public Oversight in the Field of Transport Counterterrorism Policy. Kutafin University Law Review, 2020, Vol. 7, Iss. 1 (13), pp. 67–78. DOI 10.17803/2313-5395.2020.1.13.067–078. EDN: YSCBWQ.

11. Zemlin, A. I. Problematic issues of legal support for the use of highly automated vehicles. Transportnoe pravo, 2022, Iss. 4, pp. 13–20. EDN: YNLWLS.

12. Zemlin, A. I., Matveeva, M. A., Gots, E. V., Torshin, A. A. Problem Issues of Legal Regulation of the Operation of Cars with an Automated Driving System. World of Transport and Transportation, 2022, Vol. 20, Iss. 4 (101), pp. 117–122. EDN: QLAYCZ.

13. Zemlin, A. I., Zemlina, O.M., Denisova, Yu. V. Current organizational and legal issues of applying the program-target method of financial support for development of railway transport in Russia. Transportnoe pravo i bezopasnost, 2017, Iss. 12 (24), pp. 57–71. EDN: ZXMJEL.

14. Zemlina, O. M., Migachev, A. Yu. Financial control as a way to combat corruption in the field of procurement to meet state and municipal needs [Finansoviy kontrol kak sposob borby s korruptsiei v sfere zakupok dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipalnykh nuzhd]. Organizational and legal problems of combating corruption in implementation of state and municipal procurement: Collection of scientific articles. Chekhov, 2015, pp. 36–42. EDN: UDWRCZ.

15. Levshits, D. Yu. Tax fraud in foreign countries [Nalogovoe moshennichestvo v zarubezhnykh stranakh]. Nalogi, 2007, Iss. 6, pp. 15–17. EDN: IJQYVL.

16. Levushkin, A. N., Morozov, S. Yu. Checking the counterparty before concluding a contract as an unspecified way to ensure the fulfilment of business obligations. Yurist, 2021, Iss. 7, pp.37–42. DOI: 10.18572/1812-3929-2021-7-37-42.

17. Zemlin, A. I., Pishchelko, A. V. Current problems of legal support of transport security [Aktualnie problemy pravovogo obespecheniya transportnoi bezopasnosti]// In: collection: Combating offenses in the economic sphere: legal, procedural and forensic aspects. Proceedings of international scientific-practical conference within the framework of the international legal forum «Law and Economics: National Experience and Development Strategies», 2019, pp. 51–54. EDN: UHADEK.

18. Zemlin, A. I., Kozlov, V. V. Countering terrorism. Organizational and legal support in transport: Study guide [Protivodeistvie terrorizmu. Organizatsionno-pravovoe obespechenie na transporte: Ucheb. posobie]. Moscow, Yurayt publ., 2020. Ser. 76 Higher education (1st ed.), 181 p. ISBN: 978–5–534–10013–6.

19. Bagreeva, E. G., Ragulin, A. V., Shamsunov, S. K. Crimes in the sphere of business activity: trends of impact on business in the Russian Federation. Journal of



Environmental Treatment Techniques, 2019, Vol. 7, Iss. 3, pp. 531–536. EDN: ZNZNA.

20. Kholikov, I. V. Implementation of anti-corruption policy in the business community: international legal, social and civil aspects [Realizatsiya antikorruptsionnoi politiki v biznes-soobshchestve: mezhdunarodno-pravovie, sotsialnie i grazhdansko-pravovie aspekty]. Legal and organizational problems of combating corruption in organizations with state participation (on the example of JSC Russian Railways): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, September 26, 2018. Moscow, Law Institute of RUT (MIIT), 2018, pp. 48–55. EDN: CKDTEH.

21. Zemlin, A. I. Some aspects of ensuring transport safety in the context of the spread of infectious diseases (using the example of the coronavirus pandemic COVID-19). *Voennoe pravo*, 2020, Iss. 6 (64), pp. 15–29. EDN: UIALYN.

22. Zemlin, A. I., Matveeva, M. A., Gots, E. V., Torshin, A. A. Countering the spread of coronavirus infection COVID-19 in megacities using unmanned vehicles: experience, legal and organizational aspects. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2022, Vol. 14, Iss. 6, pp. 455–483. EDN: VOMTKE.

23. Melkov, S. A., Kholikov, I. V. Economic and legal components of life safety of the population in the context of the spread of epidemics, pandemics and mass diseases. *GosReg: state regulation of public relations*, 2020, Iss. 3 (33), pp. 159–172. EDN: KBRQTF.

24. Chuchayev, A. I., Malikov, S. V. Responsibility for Causing Harm by a Highly Automated Vehicle: State and Perspectives. *Actual Problems of Russian Law*, 2019, Iss. 6(103), pp. 117–124. DOI: 10.17803/1994-1471.2019.103.6.117-124.

25. Leshchov, G. Yu. Modern aspects of formation of a regulatory framework for creation of unmanned transport infrastructure. *Vestnik evraziiskoi nauki*, 2022, Vol. 14, Iss. 1, Article 18. EDN: MUGGWJ.

26. Mayorov, V. I., Gorovenko, S. V., Kostylev, A. K., etc. Creation of a risk management system in the field of road safety: Monograph [Sozdanie sistemy upravleniya riskami v sfere obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: Monografiya]. Chelyabinsk, Tsitsero publ., 2018, 131 p. ISBN 978-5-91283-994-8.

27. Zemlin, A. I., Shinkaruk, A. S., Vishniakova, E. P. Legal and Technological Aspects of Life Cycle Contract Implementation in the Long-Distance Passenger Rail Transportation. *World of Transport and Transportation*, 2023, Vol. 21, Iss. 1 (104), pp. 87–90. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-1-10. EDN: ZSITGI.

28. Kholikov, I. V., Sazonova, K. L. International legal responsibility in the context of legal regulation of the military use of unmanned aerial vehicles. *Voennoe pravo*, 2017, Iss. 4 (44), pp. 217–226. EDN: ZFLYTF.

29. Koryakin, V. M. Ensuring the survivability of transport systems in a special military operation: legal aspect. *Transportnoe pravo i bezopasnost*, 2023, Iss. 1 (45), pp. 116–129. EDN: QKIZAI.

30. Boffa, F., Fedele, A., Iozzi, A. Congestion and incentives in the age of driverless fleets. *Journal of Urban Economics*, 2023, Vol. 137 (C), 103591. [Electronic

resource]: <https://ideas.repec.org/a/eee/juecon/v137y2023ics009411902300061x.html>. Last accessed 27.05.2023.

31. Gonzalez, E., Cordera, R., Stead, D., Nogues, S. Envisioning the driverless city using backcasting and Q-methodology. *Cities*, 2023, Vol. 133, 104159. [Electronic resource]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275122005984>. Last accessed 27.05.2023.

32. Brühwiler, L., Cheng Fu, Haosheng Huang, Longhi, L., Weibel, R. Predicting individuals car accident risk by trajectory, driving events, and geographical context. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, Vol. 93, 101760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101760>.

33. Kester, J. Insuring future automobility: A qualitative discussion of British and Dutch car insurer's responses to connected and automated vehicles. *Research in Transportation Business & Management*, 2022, Vol. 45, Part C, 100903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100903>.

34. Kholikov, I., Zemlin, A., Mamedova, I., Zemlina, O. Problems of Ensuring Security of Transport Infrastructure Facilities. *IOP Publishing Ltd, «International Science and Technology Conference «Earth Science» – Chapter 3», 2021, 42002. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042002.*

35. Zemlin, A. I. Legal means of ensuring safety of the use of unmanned vehicles in a metropolis. *Research work: grant No. 22–28–20334. Russian Science Foundation*, 2022. EDN: BSZDJV

36. Petrov, Yu. I., Zemlin, A. I., Zemlina, O. M. The Genesis of the System of Administration of the Transport Routes and of the Transport Law in Russia (9th to 18th centuries). *World of Transport and Transportation*, 2019, Vol. 17, Iss. 3 (82), pp. 260–277. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-3-260-277. EDN: KBLAQ.

37. Lukashevich, S. V. Unmanned vehicle: a paradigm shift as a consequence of digitalisation of the economy [Bespilotnoe transportnoe sredstvo: smena paradig kak sledstvie tsifrovizatsii ekonomiki]. *Transportnoe pravo*, 2019, Iss. 3, pp. 3–5. EDN: CLIRDU.

38. Zemlin, A. I., Matveeva, M. A., Gots, E. V., Torshin, A. A. Current problems of legal regulation of relations arising in connection with the use of highly automated cars: Monograph [Aktualnye problemy pravovogo regulirovaniya otnochenii, voznikayushchikh v svyazi s ispolzovaniem vysokoavtomatizirovannykh avtomobilei: Monografiya]. Moscow, KnoRus publ., 2022, 172 p. ISBN: 978–5–406–11096–6.

39. Legal means to ensure the safety of using unmanned vehicles in a metropolis. *Research report No. 22–28–20334. Russian Science Foundation*, 2022. EDN: LMIFBF.

40. Leshchov, G. Yu., Borisova, S. V. Self-regulation in the field of transport education as a type of legal regulation in transport [Samoregulirovanie a sfere transportnogo obrazovaniya kak raznovidnost pravovogo regulirovaniya na transporte]. *Transportnoe pravo i bezopasnost*, 2022, Iss. 1 (41), pp. 33–42. EDN: AVPFHK.

Information about the authors:

Zemlin, Alexander I., D.Sc. (Law), Ph.D. (Philosophy), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, expert – Scientific Director of the Centre for Expertise in Transport of Russian University of Transport, Scientific Director of the «Transport Security» direction of the Scientific Expert Council of the Centre for Security Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, zemlin.aldr@yandex.ru.

Matveeva, Maria A., Ph.D. (Law), Associate Professor at the Department of Transport Law of Law Institute of Russian University of Transport, Moscow, Russia, matveeva1987@mail.ru.

Gots, Eugenia V., Senior Lecturer at the Department of Transport Law of Law Institute of Russian University of Transport, Moscow, Russia, evgeniya.goc@mail.ru.

Article received 18.06.2023, approved 17.07.2023, accepted 20.07.2023.



LOGISTICS

272

Entangled history of a term and real processes.



NORTHERN TRAJECTORY

280

110 years ago, our predecessors supposed to lay optimum path to northern sea transit route. Economic, commercial, and technical draft specification. Final part of the article to be continued in the next issues of our journal.



HISTORY WHEEL





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-12>

The Study of the Logistics Ontology by the Historical-Genetic Method



Valery M. KURGANOV



Mikhail V. GRYAZNOV



Aleksey N. DOROFEEV

*Valery M. Kurganov*¹, *Mikhail V. Gryaznov*², *Aleksey N. Dorofeev*³

¹ Tver State University, Tver, Russia.

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

³ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia.

✉ ¹ glavreds@gmail.com.

ABSTRACT

The objective of the study is to establish the origin and evolution of the term «logistics», understood as management of material flows and stocks. The historical-genetic method and content analysis were used in the study of available sources.

The inconsistency of assumptions about the origin of the name «logistics» in the modern interpretation from ancient Greece and the Byzantine Empire is shown. There is also no connection between the mathematical logic developed by Leibniz and the content of logistics in economics and military affairs. The illegitimacy of explaining the evolution of the term «logistics» by random coincidences of words that are homonyms and related to different historical eras and countries has been established.

The priority of G. V. Jomini in formulation of the principles of logistics in his works on the art of war, written after emigration to the Russian Empire, is confirmed. Due to the spread of Jomini's works in the countries of the world, logistics began to develop in its modern form, initially in the military sphere, and then in economic activity.

The reasons that led to intensive development of logistics during the Second World War and in the post-war period are systematized. Differences in priorities during these periods in the countries of the world are studied. Two main trends were identified, one of which was to use the competitive advantages of logistics in a market environment, and the other to ensure spatial connectivity and transport accessibility of territories.

Keywords: logistics, terminology, ontology, historical genetic method.

For citation: Kurganov, V. M., Gryaznov, M. V., Dorofeev, A. N. The Study of the Logistics Ontology by the Historical-Genetic Method. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-12>.

The text of the article originally written in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

There are several dozens of definitions of «logistics» contained in textbooks, manuals, monographs and other publications. Such a discrepancy in understanding what «logistics» is can be perceived as a curiosity, because people have been engaged in organisation of material flows and storage of stocks since emergence of commodity production, i. e. since the Neolithic Revolution. At the same time, creative activity of the authors of published materials, who consider themselves specialists in logistics, has an objective basis. After all, few people think of compiling definitions of physics, astronomy, or mathematics. These branches of knowledge have already been formed.

The abundance of definitions suggests that logistics, which arose at the beginning of development of civilization simultaneously with emergence of a manufacturing economy and trade relations, began to take shape as a science relatively recently. The initial stage of any science is formation of its ontology, terminological base. The traditional understanding of ontology, as a field of philosophy that studies general categories and patterns of being, is increasingly being supplemented by specific subject aspects in the relevant fields of science. Ontology defines the subject area of research, basic concepts and relationships between them. In this sense, ontology is close in its meaning to the term «thesaurus» [1].

At the same time, the concept of «ontology» can have a more complex multi-level hierarchical structure. According to the ontology, the concepts in the chosen field of activity are divided into groups that are in horizontal and vertical relationships with each other. Relations and types of interaction between concepts are characterized. The study of ontology is important for clarifying the semantics (semantic content) of a particular area of activity, contributes to a uniform understanding of the terminology of logistics and establishment of relationships between terms [2].

The objective of the study is to establish the origin and evolution of the term «logistics», understood as management of material flows.

RESULTS

Operational Activities in Logistics and Inconsistency of Assumptions about the Origin of its Name from the Greek Language

When forming the ontology of logistics, one of the tasks is to establish the origin of the very name of this field of activity. In publications of different authors, mutually exclusive versions may be offered at the same time. The main thing

is not even that these versions are mutually exclusive and can be placed side by side, for example, in one textbook or study guide. The problem is that the information given in the literature is by no means always related to the coordination of interaction between participants in the supply chain, movement of material flows, formation of stocks, warehousing and other activities that are commonly associated with logistics in its modern sense.

One example of this approach is the search for the origins of the term «logistics» in the Greek language. In particular, its origin is associated with the ancient Greek word *λογιστική* [logistics] – «counting art» [3]. In Athens, logisticians were elected controllers who carried out financial verification of the activities of officials. If abuses were detected, the logisticians prepared materials for judicial review [4]. After reading the treatise of Aristotle (384–322 BC) [4], which mentions the ancient «auditors» and «interrogators», it becomes clear that they had nothing to do with transportation, stock management and other operations related to commodity circulation. Approximately also it is impossible to say that Norbert Wiener (1894–1964), having published his famous book «Cybernetics or Control and Communication in Animal and Machine», devoted it to the issues of navigation, because the Greek word *κυβερνητική* [cybernetics] means «the art of steering the ship», «the art of the helmsman».

Byzantine literary monuments are a valuable historical source. In particular, the work of Emperor Constantine VII Porphyrogenitus (905–959) «On the Administration of the Empire» includes a chapter «On the Dews Departing with Monoxyls from Russia to Constantinople», which contains the first documentary description of the transport support of our country's international trade with Eastern Roman Empire [5].

Greek was the official language of the Byzantine Empire. A thousand years after Aristotle, the work of the Byzantine Emperor Leo VI (866–912) «On Tactics» [6] was written based thereon, which is also often called in modern literature one of the sources for appearance of the term «logistics» in relation to the military sphere. Indeed, the emperor writes about logistics, but he has in mind the solution of personnel and financial issues of supporting the army, and not movement of troops and military equipment. To ensure movement of the Byzantine army on the march, to check the condition of roads and crossings, it was not the



«logistics», but the antikensors (**ἀντικένσorp**) that were supposed to. Their functions also included determining the need for provisions and equipment for combat operations. The antikensors, together with the minsors (μῆνσorp) or, in another spelling, the minsurators, organized the placement of troops in the camp. Supply functions were assigned to the pallikari (παλλικάριον or πάλλιξ), who served in the wagon train (τοῦλδος [touldos] or τοῦλδov [touldon]). To make sure that the Byzantine «logistics» were not engaged in what is today understood as logistics, incl. in relation to military matters, it is enough to read the work of Leo VI [6].

Quite often in the literature on logistics, it is mentioned that the great mathematician and philosopher Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) used the word «logistics» to name mathematical logic, a new direction in science he was developing. What is the meaning of the mention of Leibniz in modern literature on logistics is not clear, because it is obvious that the current content of logistics is in no way connected with mathematical (in other words, symbolic or formal) logic. Perhaps some authors suggest that the indication of the name of the scientist-encyclopedist, who created differential and integral calculus independently of Newton, will give modern logistics greater authority?

Additionally, it can be noted that Leibniz's works on mathematical logic were not published during his lifetime and were practically unknown. Logical calculus was created almost one and a half hundred years after Leibniz's death, and the beginning of work in this direction is associated with the publication in 1847 of the article by George Boole (1815–1964) «Mathematical Analysis of Logic» [7]. D. Buhl, having learned that G. Leibniz anticipated his discoveries, felt «as if Leibniz came and shook his hand through the centuries» [7]. This does credit to the English mathematician, but has nothing to do with logistics, as it is now interpreted.

In the same way, the fact that in 1904, at the suggestion of the participants in the Philosophical Congress in Geneva (one of the proposers was a native of Russia), the name used in Leibniz's manuscripts was assigned to mathematical logic is just as irrelevant to logistics as the management of material flows, – «logistics» [8]. This fact was included in the Soviet «Philosophical Encyclopedia», published in 1960–1970, and since then, for more than half a century, it has been reproduced from there in various editions

[8]. At present, if you look at the literature on mathematical logic [9; 10], it can be seen that the term «logistics» is almost never used in relation to it. So the events of the Geneva Congress of 1904 may be of interest for studying the history of philosophical thought, but not for understanding the evolution of logistics as a sphere of economic activity.

If the authors of modern publications on logistics, in search of the origin of this term, delved into ancient philosophy, then they could, relying on the authority of Aristotle, offer another version. The ancient philosopher created a system of deductive reasoning, which he called syllogistic (from the Greek συλλογίζομαι – I count, I think) [10–12]. Fortunately, logistics, as organization of goods movement, is not yet associated with syllogistics.

Also, there are no attempts yet to connect the origin of the term «logistics» with the logistic equation obtained in 1838 by the Belgian mathematician Pierre François Verhulst (1804–1849), which has been used to model population, describe economic dynamics, in ecology and in other areas [13; 14]. Given the universal nature of the logistic equation and the popularity of the logistic curve described by it (sigmoid, sigmoid curve, S-curve), we must pay tribute to the restraint of the authors of publications on logistics.

Finishing the discussion of the lack of connections between the origin of the term «logistics» and the city government of Athens three hundred years before our era, the Byzantine army of the Early Middle Ages, the creation of the foundations of mathematical logic at the turn of XVII–XVIII centuries and the Philosophical Congress at the beginning of XX century, it is appropriate to cite one of the laws of logic, as formulated by Aristotle, the author of this law: «To mean more than one thing means nothing. And if the names are devoid of meanings, then it is impossible to have a conversation with each other, and in truth with oneself ... So, as we said at the beginning, the name means something and means one thing» [15, pp. 89–90].

Attempts to explain the term «logistics» by random coincidences of words that have different meanings and refer to different historical eras are fruitless. In different languages there are homonyms – words that are the same in spelling, but different in meaning. For example, in Russian there is the word «quarry» in the meaning of «quarry» (transferred from the French carriere) and there is the word «quarry» in the meaning of «horse gallop» (it is based on the Italian carro in

the meaning of «chariot», «wagon» and the formed from it the Italian *carriera* – «fast running horse»).

To establish the origin of the concept of «logistics», it is necessary to find when, according to Aristotle, it began to «mean» the same as now, i. e. when its content became close to modern understanding and began to mean the coordination of actions of all parties involved in organization of material flows; execution of transport operations; storage and distribution of stocks and other related operations. Moreover, material flows should be understood not only as movement of various goods, but also as movement of people.

The role of G. V. Jomini in Creation of Logistics as a Modern Science

The emergence of logistics as a science is associated with the name of Genrikh Veniaminovich Jomini (1779–1869). Since Jomini was a professional military man, he developed logistics as one of the components of military art, in which he emphasized strategy, tactics and logistics [16, pp. 29–30; 134; 140–141]. No more and no less: in his opinion, in order to win in hostilities, it is necessary to master the strategy, tactics and logistics. Jomini defined logistics as the practical art of moving armies, the detailed organization of marches, the arrangement of camps, the placement of troops in apartments – all this ensures achievement of strategic and tactical goals [16, pp. 140–141]. After the works of Jomini, the term «logistics» began to be used in its modern meaning, first in military affairs, and then to designate the corresponding area of economic activity.

The creator of the science of military logistics, from which modern civilian logistics later grew, deserves at least a few words to describe his life path. Jomini is often referred to in literature as a French military theorist. Surprisingly, sometimes in domestic publications you can even find the English spelling of his last name – «Jomini».

In fact, Antoine-Henri Jomini (Antoine-Henri Jomini, that was his birth name) was born into a wealthy Swiss family. He entered the military service in Switzerland. Soon, as a very young man, he wrote a two-volume work, the title of which cannot fail to impress even in a brief reproduction: *Traité des grandes opérations militaires...* («Treatise on great hostilities ...»). Wanting to publish it, he achieved in 1804 an audience with the French Marshal Ney. He allocated the necessary funds and invited the

young Swiss to his service. Thus began his career in the Napoleonic army. Jomini's treatise, subsequently supplemented, was repeatedly reprinted, incl. in Russia, Britain, America [17].

In 1813, the 34-year-old Jomini, who already had the rank of brigadier general since 1811, had a conflict with the chief of staff of the French army, Marshal Berthier. As a result, he decided to emigrate to Russia, where he was promoted to the rank of lieutenant general. He adopted the name Genrikh Veniaminovich, having converted to Orthodoxy, and for 56 years remained a Russian subject, until his death. While living in Russia, he continued to write his works in French, since he never learned Russian. This was not necessary, since French was the common language in Russian high society. However, his works were translated and published in Russian. The most significant work is the «Brief outline of military art», written in 1837, originally «for the instruction of the august person» [16, p. 1] (heir to the throne Alexander Nikolaevich, future Emperor Alexander II). In 1840, 27 years after Jomini's emigration to Russia, it was published in Russian [16]. The book was constantly supplemented and substantially revised by the author, gaining popularity in various countries. In 1939, under the title «Essays on the Art of War», it was published by the People's Commissariat for Defense of the USSR (translated from the original in 1855 in French) [18]. It is in the second volume of this book that the most complete and accurate presentation of Jomini's ideas about military logistics is contained, to which Chapter VI «On Logistics, or on the Practical Art of Setting Armies in Motion» is devoted. In XXI century, the book of Genrikh Veniaminovich Jomini is not forgotten and continues to be republished [19].

Speaking about development of logistics in our country in XIX century, it is appropriate to recall that its name was included by V. I. Dahl (1801–1872) in his famous «Explanatory Dictionary» (in the explanation to the article «Logic»): «Logistics ... a part of tactics, about movement of troops» [20, p. 262]. Knowing about the friendship and constant communication between V. I. Dahl and A. S. Pushkin, it can be assumed that the term «logistics» will someday be found in the creative heritage of the great poet.

Jomini did not exaggerate or underestimate his contribution to logistics. He noted that the first systematic description of military logistics («the first experience of logistics») was given by Jacques-Francois de Chastenot, Marquis de Puysegur (1656–1743) [16, p. 2], author of the



treatise *The Art of War*, which was published after his death in 1749.

Under the «Sun King», Louis XIV, Puysegur held the position of *maréchal général des logis*, which translates into Russian approximately as «chief marshal of apartments». In publications on French military history, it is noted that from the second half of XVI century, the functions of this commander included organizing army marches, organizing and building a camp, supplying provisions and ammunition. This is approximately how the functions of the chief of staff are understood in the armies of other countries. As soon as the commander-in-chief determined the final destination of the army, the chief marshal of apartments (*maréchal général des logis*) carried out reconnaissance of the area, studied the condition of roads and crossings, determined the places for setting up camps and placing the army in apartments, the procedure for providing food and ammunition, compiled maps, after which developed march orders – detailed routes for each column. Mistakes could lead to the loss of a military campaign [21].

To concentrate superior forces in the most important direction in the right place and at the right time, ensuring a decisive advantage over the enemy – this is the principle of the victory of all outstanding commanders: Alexander the Great, Hannibal, Caesar, Rumyantsev, Napoleon, Suvorov, Kutuzov. The opposite is also true: strategic miscalculations in logistics lead, in the end, to military defeat. For this reason, Hannibal defeated the Romans in Italy for 15 years, but was forced to evacuate his troops from there. Two thousand years after Hannibal, the impossibility of logistical support for Napoleon's army led, in combination with other factors, to its complete destruction in Russia. Napoleon abandoned the remnants of his troops and fled to Paris. By the way, the frosts in 1812 began when the French army had practically ceased to exist. The people's memory has preserved the words of M. I. Kutuzov in an address to the troops: «The war is over for the complete extermination of the enemy».

Based on the experience of his predecessors, Jomini wrote: «The word «logistics», as you know, comes from Major general des logis (translated in German as «quartermaster»), i. e. from the name of that category of officers whose duty once consisted in placing troops in apartments or in camps, in the direction of the columns, and in placing them on the spot. This was the end of all the logistics, which, as we see, included the arrangement of ordinary camps. But after the new method of warfare without camps

was established, the movements became more complex, and therefore the headquarters also received wider rights and duties ... the old logistics is no longer sufficient to designate the science of the headquarters ... it needs to be given a different development and make a new science out of it» [18].

The merit of Jomini is that his book gives a clear and unambiguous answer to the question of the origin of the term «logistics».

The term «logistics» in the modern sense comes from the French word *le logis* – dwelling. This term is associated with the need to provide housing for the army when it moves during marches. Gradually, the content of logistics expanded, and it became, in the words of Jomini, «a new science» [18].

In French, there are other words with the same root and similar meanings, for example, *loge* – a box, a room, a cell; *le logement* – housing, apartment. From French, the word *das logis* meaning dwelling, came into the German language [22, p. 54]. In German, there are also words *logieren* – (temporarily) to live; lodge; settle; arrange for residence; *das lager* – warehouse, camp, storage, store. There are cognates of a similar meaning in Russian and other Slavic languages: *lair*, *log*, *rookery*, *bed*, *lie*. It can be assumed that the root «log» characterizes the etymological connections of words in the languages of the Indo-European family (in particular, French, German, Russian and other languages of this family) with the meanings of «dwelling» (both for people and for animals), «location», «room», etc. It can be assumed that the Latin word *locus* (place) also has a similar origin.

The term «logistics» appeared in the French army from the second half of 16th century, long before Jomini, to refer to organization of troop movements, their placement in apartments and camps, the supply of food and military equipment. The enduring significance of Jomini's work also lies in the fact that he formulated the tasks of the «new» logistics, which is fundamentally different from the «old» logistics, from the previous ideas about its content. It is extremely important that all these tasks are very easily interpreted in relation to economic activity in the civilian sphere [23, pp. 16–17], although he himself, as a professional military man, most likely did not think about it.

Doctor of History, Associate Professor of History at the Florida State University (USA), Eman Vovsi, who examined in detail the activities of G. V. Jomini in several scientific papers, cites

information that his ««principles of military art «... laid the foundation for professional military education in Russia, as well as in the countries of Europe and North America in XIX–XX centuries» [17]. After Jomini, logistics acquired its modern significance, first in the military field of the leading countries of the world, and then in the civilian sphere.

Spread of Logistics Technology from the Military to the Economy after World War II

The solution of logistical problems in the military sphere is most important for countries that are forced to provide and coordinate military operations in remote and vast territories. During the Second World War, such a need was especially acute for Germany and Japan, on the one hand, and for the Soviet Union and the United States, reflecting their aggression, on the other hand.

For almost four years, Germany and the Soviet Union waged against each other, mainly ground operations along a huge line with involvement of numerous army formations in need of food and equipment, ammunition and military equipment. It required creation of stocks and transport support. It was necessary to effectively manage logistics, organize the interaction of the front and rear.

In the initial period of the war, the Soviet Union successfully carried out a logistic operation of evacuation of more than 1500 industrial enterprises in Volga region, the Urals, Siberia and the union republics of Central Asia, unprecedented in scale and timing.

The United States had to solve the problems of maritime military logistics in the war with Japan in Southeast Asia and the Pacific, as well as create conditions for combat operations on land in Europe and North Africa. The complex logistical tasks of the US lend-lease program were solved jointly with the USSR and Great Britain. From the Western Hemisphere, supplies to the Soviet Union were carried out along the Pacific route (via Vladivostok, then along the Trans-Siberian Railway), through the ports of the Persian Gulf and the land transport network of Iran, then by the ships of the Caspian military flotilla, and also through Murmansk by Arctic convoys, through Alaska and the Black Sea.

One of the largest logistical operations of the US-British armed forces was the landing in Normandy (1944, Operation Overlord).

Throughout the war, America had a constant challenge to provide efficient maritime and land

logistics in theaters of operations located at a considerable distance from its territory.

Difficult logistical tasks after the Second World War faced the United States during the occupation of Germany and Japan, as well as in conflicts in Korea (1950–1953), during the Lebanese crisis (1958), in Vietnam (1955–1975) and in other parts of the globe.

Almost immediately after the war, a network of American military bases began to be created, which currently has more than a thousand facilities in 150 countries [24]. Their infrastructure is growing and requires constant logistics support from the United States.

The continuous complication of the tasks of military logistics has led to the need for the US Army to use the scientific potential of universities, research centers and consulting companies. Military logistics began to penetrate into the civilian sphere, and developments in coordination of material flows, inventory management, and the choice of optimal transport links began to be used in the 1950/60s not only by the army, but also in business to improve supply, organize production and market finished products, to move from solving particular problems to integrated management of movement of goods from suppliers to end consumers.

Along with logistics technologies for coordination of transport and warehouse operations, integrated material management, the corresponding terminology was spread. Literature on logistics began to be published. One of the first publications was an article by Roy Alderson «Marketing effectiveness and the principle of delayed delivery» [25].

Professional associations appeared, one of the tasks of which was development of glossaries and unification of terminology. In 1963, the National Council of Physical Distribution Management was created, reorganized in 1985 into the Council of Logistics Management (CLM). Since 2004, it has changed its name again and currently functions as the Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) [26].

The process of interaction between business and the army in the United States was bilateral. For example, the entrepreneur Malcom McLean (1913–2001) created the first multimodal transportation scheme in modern containers in 1954. And rapid development of the use of containers occurred when it became necessary to support military operations of the American army in Vietnam, and McLean received a large order for transportation from the US military



department. Pretty soon, this technology spread around the world and was called the «container revolution».

The acquisition of competencies and skills in logistics was also facilitated by the large size of the United States and open access to the Pacific and Atlantic oceans with many ice-free ports on a long coastline.

Period of 1950–60s is characterized not only by intensification of interaction in the US army, science and business in the field of logistics. At this time, the economy began to change.

America has become one of the richest countries in the world. 6 % of the world's population lived in it, and 66 % of all goods produced in the world were produced and consumed. The average American family with several children has become the standard for having a comfortable suburban home, owning two or more cars, and being able to purchase a variety of goods and use a variety of services. Convenient roads were built. Retail chains with large shopping centers appeared and intensively expanded, one example of which was Wal-Mart founded in 1962 [27].

This meant not only an increase in the well-being of US citizens. Residents of country houses, to a much greater extent than those living in apartments, are characterized by an increased demand for cars, household appliances, and furniture. They buy tools for home use, lawn and flower garden maintenance, minor repairs, and the like. Therefore, an increase in construction of individual houses leads to an expansion of trade and the need to deliver a variety of goods to all objects of the commodity distribution network, up to final consumers.

Competition in business began to shift to the area of struggle for the buyer, the assortment of goods increased, and after-sales service spread. Stocks began to increase, the costs of promoting goods to buyers increased, and there was a need to improve logistics. To solve managerial problems, economic and mathematical methods and computer technology began to be used. Logistics has become indispensable in the competitive struggle of enterprises in the market environment, first in the United States, and then around the world.

CONCLUSIONS

1. The analysis of primary sources concerning urban self-government in Athens in IV century BC and the Byzantine army at the turn of IX–X centuries, he established that the assumptions about the Greek origin of the name of logistics,

understood as organization of material flows and management of commodity stocks, are unfounded.

2. The term «logistics» began to take shape initially in the French army in XVI–XVII centuries and was associated with a comprehensive solution to the problems of troop movement: organizing marches and camps, providing troops with housing, supplying food, ammunition and military equipment. The position of the head of the service of the General Staff, who dealt with these tasks, was called *maréchal général des logis*, which translates into Russian as «chief marshal of apartments» (from the French word *le logis* – dwelling).

3. The principles of military logistics in the modern sense were first formulated by G. V. Jomini in one of the chapters of the book «A Brief Outline of Military Art», written after his emigration to Russia, published in Russian in 1840 and originally intended to teach the basics of military affairs to the heir throne, the future Emperor Alexander II. Subsequently, the book was repeatedly reprinted and proved to be in demand in professional military education not only in Russia, but also in Europe and North America.

4. Military logistics received active development during the Second World War, when military operations were conducted in almost all regions of the globe. Military logistics was of particular importance for the United States in connection with the need to ensure the combat capability of its armed forces in Southeast Asia, the Pacific Ocean, Europe, North Africa and to carry out deliveries under the Lend-Lease program.

5. After the Second World War, military logistics in the United States continued to develop rapidly due to the military operations of their armed forces in different regions of the planet, the occupation of Germany and Japan, and the creation of an extensive network of military bases in 150 countries of the world. The involvement of research organizations to improve military logistics began to lead to the spread of its principles from the military sphere to the economy. The reverse process was also carried out, when business developments in the field of logistics were used by the US Army.

6. The growth in the welfare of the population and rapid development of the economy have led to the fact that in the competitive struggle of enterprises, the emphasis has shifted towards logistics, first in the United States, and then in other countries of the world. Professional

associations began to form and literature on logistics and supply chain management began to be published.

REFERENCES

1. Zakharenko, E. N., Komarova, L. N., Nechaeva, I. V. New dictionary of foreign words [Noviy slovar inostrannykh slov]. Moscow, Azbukovnik publ., 2008, 1040 p. ISBN 5-93786-034-9.
2. Dobrov, B. V., Ivanov, V. V., Lukashevich, N. V., Soloviev, V. D. Ontologies and Thesauri: Models, Tools, Applications: Study guide [Ontologii i tezaurusy: modeli, instrument, prilozheniya: Uchebnoe posobie]. Moscow, Internet University of Information Technologies; BINOM. Laboratory of knowledge, 2009, 173 p. ISBN 978-5-9963-0007-5.
3. Ancient Greek-Russian dictionary. [Electronic resource]: <https://translate.academic.ru/λογιστική/el/ru>. Last accessed 25.02.2023.
4. Aristotle. Athenian polity. 2nd ed. // Translation and remarks of prof. S. I. Radtsig. Moscow, State social economy publishing house, 1937, 131 p.
5. Constantine Porphyrogenitus. On the management of the empire. Moscow, Nauka publ., 1991, 268 p. ISBN 5-02-008637-1 (in transl.).
6. Leo VI the Wise. Leo Tactics. Publ. prepared by V. V. Kuchma; chief. ed. N. D. Barabanov. St.Petersburg, Alteya publ., 2012, 368 p. – (Series «Byzantine Library. Sources»). ISBN 978-5-91419-747-3.
7. Peckhaus, V. Leibniz's Influence on 19th Century Logic. The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2018 Edition), Edward N. Zalta (ed.). [Electronic resource]: <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/leibniz-logic-influence>. Last accessed 25.02.2023.
8. Artem-Aleksandrov, K. V. On the Second and Third World Philosophical Congresses [O vtorom i tretem mirovykh filosofskikh kongressakh]. Vestnik Russkoi khristianskoi gumanitarnoi akademii, 2015, Vol. 16, Iss. 1, pp. 187–192. [Electronic resource]: http://vestnik.rhga.ru/archive/Vestnik_2015_01.pdf. Last accessed 25.02.2023.
9. Alyabeva, V. G. Mathematical logic. Formal Logic: Study Guide [Matematicheskaya logika. Formalnaya logika: Uchebnoe posobie]. Perm, 2021, 109 p. ISBN 978-5-7944-3611-2.
10. Zyuzkov, V. M. Mathematical Logic and Theory of Algorithms: Study Guide [Matematicheskaya logika i teoriya avgoritmov: Uchebnoe posobie]. Tomsk, El Content publ., 2015, 236 p. ISBN 978-5-4332-0197-2.
11. Chanyshchev, A. N. Aristotle. Moscow, Mysl publ., 1987, 221 p.
12. Asmus, V. F. Ancient philosophy [Antichnaya filosofiya]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 400 p. ISBN 5-06-003049-0.
13. Verhulst Pierre François. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspondence Mathematique et Physique (Bruxelles), 1838, T. 10, pp. 113–121. [Electronic resource]: <https://link.springer.com/article/10.1007/bf02309004>.
14. Moskovkin, V. M., Zhuravka, A. V. Pierre-Francois Verhulst – the forgotten discoverer of the law of logistic growth and one of the founders of economic dynamics [Pierre-Francois Verhulst – zabytyy pervootkryvatel zakona logisticheskogo rosta i odin iz osnovatelei ekonomicheskoi dinamiki]. Originalnye issledovaniya (ORIS), 2020, Iss. 7, pp. 207–218. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/343769532_Moskovkin_V_M_Per_Fransua_Ferhulst_-_zabytyj_pervootkryvatel_zakona_logisticheskogo_rosta_i_odin_iz_osnovatelej_ekonomicheskoy_dinamiki_VM_Moskovkin_AV_Zuravka_Originalnye_issledovaniya_nauc-prakt_elektr. Last accessed 25.02.2023.
15. Aristotle. Metaphysics. Transl. from Ancient Greek. Introd. article and comments by A. V. Markov. Moscow, Ripol-Klassik publ., 2018, 384 p. ISBN 978-5-386-10325-5.
16. Jomini, G. V. A brief outline of the military art or a new analytical review of the main considerations of strategy, higher tactics and military policy. Part 1. St.Petersburg, Print house of communication lines and public buildings, 1840, 408 p.
17. Vovsi, E. From Austerlitz to Tilsit: The Military and Literary Activities of Antoine-Henri Jomini, 1805–1807. [Electronic resource]: <http://www.reenactor.ru/ARH/PDF/Eman.pdf>. Last accessed 25.02.2023.
18. Jomini, G. V. Essays on military art / Transl. from French [ed. 1855. Antique Edition]. In 2 Vol. Moscow, State military publishing house of the People's Commissariat of Defence of the USSR, 1939. ISBN 978-5-0000-0000-0.
19. Jomini, G. V. Essays on military art / Transl. from French. Moscow, Librokom publ., 2021, 432 p. ISBN 978-5-397-07563-3.
20. Dahl, V. I. Explanatory dictionary of the living Great Russian language. Reprint reproduction of the 1881 edition by M. O. Volf. Vol. 2. I-O. – St. Petersburg, Diamant publ., 1996, 784 p. ISBN 5-300-01627-6.
21. Svistunov, A. Victory loves perseverance [Pobeda lyubit userdie]. [Electronic resource]: <https://warspot.ru/13350-pobeda-lyubit-userdie>. Last accessed 25.02.2023.
22. Large German-Russian Dictionary. In 2 Vol. Author-compiler E. I. Lepping, N. I. Filicheva, M. Ya. Tsvilling; ed. by O. I. Moskalsky. 12th ed. rev. Moscow, Russian language-Media; Drofa publ., 2010, 1004 p. ISBN 978-5-9576-0502-7.
23. Grigoriev, M. N., Uvarov, S. A. Logistics. Basic course [Logistika. Bazoviy kurs]. 4th ed., rev. and enl. Moscow, Yurait publ., 2022, 818 p. ISBN 978-5-9916-2731-3.
24. Vine, D. The Pentagon's New Generation of Secret Military Bases. [Electronic resource]: <https://web.archive.org/web/20201122054053/https://www.motherjones.com/politics/2012/07/pentagon-new-generation-military-bases-tom-dispatch>. Last accessed 25.02.2023.
25. Alderson, W. Marketing efficiency and the principle of postponement. Cost and Profit Outlook, 1950, Vol. 3, No. 4, pp. 15–18.
26. Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). [Electronic resource]: <https://cscmp.org>. Last accessed 25.02.2023.
27. USA in the 1950s – the post-war heyday of the state [SShA v 1950-kh godakh – poslevoenniy rastsvet gosudarstva]. [Electronic resource]: <https://usa-24.ru/ssha-v-1950-x-godax-poslevoenniy-rastsvet-gosudarstva>. Last accessed 25.02.2023. ●

Information about the authors:

Kurganov, Valery M., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Enterprise Economics and Management of Tver State University, Tver, Russia, glavreds@gmail.com.

Gryaznov, Mikhail V., D.Sc. (Eng), Associate Professor at the Department of Logistics and Transport Systems Management of Novos Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, gm-autolab@mail.ru.

Dorofeev, Aleksey N., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Financial Technologies of Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia, andorofeev@fa.ru.

Article received 26.04.2023, approved 14.06.2023, accepted 18.06.2023.





Northern Siberian Trade Route and Polar Urals Railway. Part 2



Archival publications

A reproduced article published in the journal «Zhelezнодороzhnoe delo» in 1912 is devoted to a project to build a railway line linking the river network of Siberia (approximately from the current Salekhard to the Ob) with the Arctic coast in Varandey region, where it was supposed to build a seaport.

Regardless of the fact that development of the transport infrastructure of the Polar Urals and the North of the European part of Russia eventually went the other way, the economic geography, the foreign trade balance changed, the article is interesting in the historical aspect by the balanced and verified approach to the comprehensive assessment of complex transport projects that was developed more than 110 years ago and their feasibility study. The authors of the project under consideration took into account, when arguing, many factors – of a strategic nature (development of the Siberian region, reduction of the transport load on the backbone transport network of the European part of the country, minimization of competition between domestic producers along the route of goods flows), foreign trade flows, seasonality of navigation along rivers and the Northern Sea Route, technical and economic aspects of construction, distribution of private and public investments, projected optimal tariffs and taxation, payback periods, taking into account payment of dividends, and many others.

Of course, the content of factors taken into account and assessment methods have changed significantly since then. One of the paradoxes is that, despite new technologies, modern engineers already assess the risks and difficulties of building in the subpolar zone much higher, which at the beginning of the last century was considered almost an easy and cheaper option for building a railway. In general, we must give credit to the authors for complexity of their approaches, taking into account the time when they were made.

Keywords: transport, transport history, infrastructure project, subpolar Urals, Arctic zone.

Acknowledgements: the editors express their gratitude to the staff of the library of Russian University of Transport for their kind assistance in preparing the publication.

For citation: Northern Siberian Trade Route and Polar Urals Railway. Part 2. World of Transport and Transportation, 2023, Vol. 21, Iss. 3 (106), pp. 280–290. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-13>.

The text of the archival originally written in Russian is published in the first part of the issue.
Текст архивной статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

Area of influence and its cargoes. On the basis of a very rich, but, unfortunately, scattered statistical material on the productive forces of Western Siberia, the following conclusions can be drawn: the annual surplus of the main local products in recent years has been¹:

I. Wheat, rye, barley and oats:	
a) in Tomsk province from 8 300 000 to 20 200 000 p.	
b) « Tobolsk province «10 700 000 «23 000 000 «	
c) «Akmolinsk province « 2 000 000 « 11 800 000 «	
d) «Semipalatinsk « 2 000 000 « 11 800 000 «	
Total from 21 000 000 to 55 000 000 p.	
Av. number – «38 000 000 p. ²	
II. Flax, hemp and tows	500 000
III. Flaxseed	700 000
IV. Cow butter.....	2 000 000
V. Live cattle (up to 200 thous.).....	1 600 000
VI. Bacon and pork.....	800 000
VII. Wool, leather and furs.....	550 000
VIII. Meat salted and frozen and game.....	2 800 000
IX. Fish in different forms.....	300 000
X. Pressed hay.....	2 000 000
XI. Ores, metals and coal	?
XII. Other goods	1 000 000
Total per year (except item XI) not less than 50 250 000 p.	
Kr. ch.....	50 000 000 ³

It is obvious that a lot of this amount of Siberian raw materials will continue to be exported to the Urals and further to Arkhangelsk and to the west along the existing communication routes. There is also no doubt that some cargo will continue to be sent from Western Siberia to Eastern Siberia. However, taking into account the vast expanses of the most fertile chernozem soil within Western and Central Siberia, the cultivation of which has only recently begun, with development of resettlement, as well as the fact that an increase in productivity of the region is directly dependent on demand and ease of export corresponding products to their

¹ According to the Siberian Department of Imp. Geogr. Society, verified and replenished by E. A. Zhernakov and I. I. Ignatov. Very valuable indications are also given in hist. essay: «Siberian railway, the road in its past and present», comp. S. Sabler and I. Sosnovsky, under ch. ed. senior secretary Kulomzin. St.Petersburg, 1903, pp. 402–415, and in the article by V. Grigoriev: «What can the Turkestan-Siberian railway give us». Vestnik putei soobshcheniya 1905; Nos. 25 and 26.

² This amount of the annual supply of Siberian bread is also confirmed by the reports of local governors and heads of regions over the past ten years (from 1894 to 1904).

³ With addition of ores, metals and coal – over 80 million pounds. Average cargo traffic counts of the Siberian railway.

destinations, there is no doubt that the main part of the above-mentioned goods will gravitate towards European markets, choosing for themselves *the most convenient* and *cheapest* way of export, i. e., the considered *Northern Siberian trade route*.

The validity of this assumption is confirmed by the following calculation.

Local prices in Western Siberia, for example, for wheat fluctuate at present from 35 to 45 kop. per pood, the average price of a pood of wheat in London⁴ in recent years has been kr. ch. 107 kop. There is no doubt that, with the opening of a secure route for the sale of Western Siberian products to Europe, Siberian raw materials will rise in price, which means that the difference in the cost of the same Siberian wheat in the places of production and consumption will not be 107–40 = 67 kop., but, perhaps, only 50 kop. The cost of transporting one pood of wheat along the route under consideration, including overhead costs, will be:

- 1) water from st. «Ob» to st. «Sob», 2 400 v. downstream. 7,00 kop.⁵
- 2) along Polar-Ural railway from st. «Sob» to the seaport «Varandey» (400 ver.), with the cost of reloading and other expenses...12,00 kop..⁶
- 3) port expenses..... 3,50 kop..⁷

⁴ The following conclusions apply to most other markets as well.

⁵ According to Tyumen steamship owners.

⁶ And namely:

- a) actual transportation cost 400x1/45= kr. ch. 9,00 kop.
 - b) additional railway costs substituted for Polar-Ural Railway of railway «forwarding fee» in..... 1,50 kop.
 - c) for passing grain through two elevators..... 1,50 kop.
- Total 12,00 kop.

⁷ For Polar-Ural railway, which rests, on the one hand, on the seaport (Varandey), and on the other hand, on the river harbor (Sob station), supplied with necessary hydraulic structures and equipment, – as components of the road – at the expense of private society, it is proposed to set the collection fee at 0,50 kop. higher than in other ports, i. e. in the amount of 0,75 kop. up to 1,50 kop., or on average, one kop. each from all cargo passing through both end points of the road; as for the actual ship dues, this can amount to approximately 2,50 kop. per a pood, and therefore the full port dues for the future Medynsky port will be 3,50 kop. This amount of the total port dues cannot be considered exaggerated if we take into account the significant costs that will be associated with construction, maintenance, repair and gradual development of the river harbor and seaport with their accessories (flyovers, cranes, steamers, icebreakers, etc.), as well as repayment of the necessary funds.



4) for transportation of grain by sea from Medynsky port to London, with insurance costs10,00 kop.⁸

Total 32,50 kop.
and therefore the difference in the prices of wheat, when it is exported along the Northern Siberian route, will give a still free (useful) stock of 50–32,50 = 17,50 kop. per pood.⁹

In parallel to this, transportation of bread in grain from st. «Ob» to London, through the main ports of European Russia costs:

From a pood in kopecks:

through and namely:	Arkch.	Spb.	Revel	Riga	Libava
1. Carriage fee for railway. ¹	35,26	54,88	57,43	57,81	59,29
2. Freight river and sea.	13,50 ²	6,00	6,00	5,00	4,50
3. Overheads ³	6,23	6,23	6,23	6,23	6,23
Total	54,99	67,11	69,66	69,04	70,02

Here it is appropriate to note that on the existing railways, additional railway fees for grain cargoes amount to 1,23 kop. from a pood (including cumulative station expenses – 0,50 kop.; for loading and unloading – 0,33 kop.; for weighing – 0,20 kop.; and for a fee of $\frac{1}{5}$ kop. – 0,20 kop., total – 1,23 kop.), and for other goods – according to their classification – from 0,97 to 1,48 kop. for a pood. But since the road under consideration will be in exceptional conditions, requiring the possible simplification of its cargo operations and calculations, it is proposed to replace the aforementioned rates with one general *forwarding fee* of 1,50 kop. from a pood for grain cargo and 1,75 kop. for other cargoes.

Adding to these rates 107–50=57 kop., corresponding to the above av. Siberian wheat prices at st. «Ob», its value on London market would have received only ... 111,99 | 124,11 | 126,66 | 126,04 | 127,02, i. e. it would have been *higher than* the average prices for kop. that existed there in recent years 4,99 | 17,11 | 19,06 | 19,04 | 20,02.

⁸ With regard to the event held with the Dutch Trading House «William Ch. Miller & C^o» agreement, on the basis of which the indicated tariff is established for all sea transports between Arkhangelsk, on the one hand, and Rotterdam, Amsterdam, Antwerp, Bremen, Hamburg, London, Hull, Newcastle and Leith, on the other.

⁹ In reality, the indicated difference should be even greater, since transportation of grain by railway in bulk is taxed at a rate lower than 1/45 kop. from a pood and a verst.

These conclusions explain, among other things, why Siberian bread, when exported abroad, even along the shortest of the existing transit routes, through Chelyabinsk, Kotlas and Arkhangelsk, enters the markets of Western Europe in a relatively limited amount (only from $1\frac{1}{2}$ to 3 million poods a year) and, moreover, only when its purchase price at the place of production does not exceed 46 to 48 kop..¹⁰

It was not mentioned above about the export of *Siberian* timber because, until now, it actually did not exist. However, there is no doubt that, with the opening of a convenient and cheap way to sell it abroad, it can become one of the most important items in the export trade of Siberia.

Based on research carried out in 1898–1903 by the Samarovsky forester A. A. Dunin-Gorkavich on the state of state forests in the northern part of Tobolsk province,¹¹ as well as according to data cited by the railway engineer S. A. Zhbikovsky in his brochure «Ob-Yenisei waterway and its economic importance»,¹² the forest areas of Siberia in the basins of the Ob and Yenisei are so extensive that they cannot even be compared with Canada.¹³ Taking into account only the forest plantations of Berezovsky and Surgut districts of Tobolsk province that are closest to the rail track under consideration, the annual vacation of forests from them, thickness, from 9 to 12 versh, at breast height, can be determined at 1 700 000 pieces logs,¹⁴ or trimmed, kr. ch. in 51 million cubic meters foot. (310 000 standard), weighing the same number of poods.

The cost of felling, transportation and delivery of timber along the Ob and its tributaries

¹⁰ At these prices for interest on working capital and on profits, only 6 to 4 kopecks remain from a pood.

¹¹ Izvestiya M-va. Zemledeliya. 1903 № 41.

¹² «Materials for the description of Russian rivers and the history of improving their navigation conditions». Iss. II. 1903.

¹³ The area of currently surveyed forest thickets of Tobolsk province is estimated at 16 520 000 des., and that of the four counties of the Yenisei province, which make up only 1/10 of the entire province, is 8 mil. dec. Taking into account the remarks made on this subject by Eng. S. A. Zhbikovsky, as well as the instructions of A. A. Radzing in his book: «Forest and Forestry», 1901, there is a reason to believe that the forest spaces of the Yenisei province are over 100 mil. des. For various reasons based on calculations, we stop at the following figures:
pure forest plantations in Tobolsk province 20 000 000 des.
« « Tomsk « 11 200 000
« « Yenisei « 32 800 000
total 64 000 000

¹⁴ See A. A. Dunin-Gorkavich. «Tobolsk North». 1904.

№ п. по пор.	Кл. тарифа.	До:	ст. «Обь».			ст. «Иркутск».		
		через:	Батрак Челноб.	Вар. п. «Собь».	Разни- ца.	Батрак Челноб.	Вар. п. «Собь».	Разни- ца.
1	I	С.-Петербургга	195,31	62,93	132,38	262,63	160,40	102,14
2		Москвы	179,96	114,27	65,69	234,02	211,83	22,19
3	II	С.-Петербургга	182,69	56,86	125,83	262,63	138,80	123,83
4		Москвы	158,86	99,64	59,22	234,02	181,58	52,44
5	III	С.-Петербургга	152,49	50,78	101,71	219,10	116,98	102,12
6		Москвы	136,96	85,01	51,95	195,26	150,81	44,45
7	IV	С.-Петербургга	126,20	46,48	79,72	164,70	103,33	61,37
8		Москвы	115,96	75,30	40,66	146,82	131,05	15,77
9	V	С.-Петербургга	100,02	41,42	58,60	132,05	84,10	47,95
10		Москвы	92,34	62,81	29,53	117,75	105,49	12,26
11	VI	С.-Петербургга	92,08	38,13	53,95	132,05	72,97	59,08
12		Москвы	77,76	55,24	22,52	117,75	90,08	27,67
13	VII	С.-Петербургга	76,98	36,11	40,87	110,29	65,72	44,57
14		Москвы	65,04	50,27	14,77	98,37	79,98	18,39
15	VIII	С.-Петербургга	69,43	34,84	34,59	99,41	61,81	37,60
16		Москвы	58,69	47,68	11,01	88,68	74,68	14,00
17	IX	С.-Петербургга	61,88	33,83	28,05	88,57	58,22	30,35
18		Москвы	52,33	45,23	7,10	78,99	69,63	9,36
19	X	С.-Петербургга	61,22	31,96	29,26	88,57	52,53	36,04
20		Москвы	51,77	41,25	10,52	78,14	62,82	15,32
21	XI	С.-Петербургга	53,25	31,13	22,12	76,09	50,20	25,89
22		Москвы	45,07	39,18	5,89	67,92	58,33	9,59
23	XII	С.-Петербургга	40,31	29,78	10,53	57,44	45,02	12,42
24		Москвы	34,17	35,82	-1,65	51,31	51,06	0,25

to the station «Sob», including overhead costs, will be about 4,75 rubles per circle from a log, and with sawing and lining – 6,10 rubles, i. e., per cubic meter or pood – $6,10:30 = 20$ kopecks, while transporting a pood of handicrafts to foreign ports, with all additional costs, will cost no more than 40 kopecks. Thus, the cost of the Siberian timber, in a processed form, in the markets of England, France and Germany will not exceed for a cubic feet 60 kopecks, while the current prices for forest products fluctuate there between 76 and 115 kopecks.¹⁵ On the other hand, since construction of the road will require about $3\frac{1}{2}$ years, then, already before its completion, at st. «Sob» a significant amount of timber¹⁶ can be delivered, which, in view of the increasing demand for it abroad, from the very first year of opening along the road of correct movement will have the opportunity to go to the places of sale.

It remains to add that 4,75 rubles included in the above price per stumps [payment to the treasury for the number of trees cut down, «stumps» – ed. note] money is, on average, not less than 1,15 rubles per a tree, and therefore it is obvious that with implementation of Polar Urals Railway, state revenues from state-owned forests can take on unprecedented proportions.

¹⁵ See S. A. Zhbikovskiy. «Ob-Yenisei waterway». p. 35.

¹⁶ Here, by the way, it should be noted that sale of timber materials abroad from Arkhangelsk port is:
in 1862184 000 stand.
in 19001 240 000 stand.
« 1890 « 366.000 «
« 1905 «1.590.000 «.

On the basis of the given data, it is possible to assume that, with rebuilding of the railway in question and with establishment of the correct steamship communication along the Ob, out of the above total amount of Siberian cargo (50 million poods, except for timber and metals) for export to European Russia and abroad, through the Varandey port, in the very first years of operation, at least 50 %, i. e., up to 25 million, and together with forest products and metals – from 55 to 70 million poods, will flow.

As for the goods *imported* into Siberia, it is not yet possible to draw exact conclusions with respect to the communication under consideration, but in order to illuminate, as far as possible, this side of the future activity of the Northern Trade Route, we present the following considerations.

Before construction of the great Siberian railway goods, imported to Siberia from European Russia, including foreign ones, were sent for the most part to Nizhny Novgorod, then along the Volga and Kama to Perm, and from there along the Perm-Tyumen railway to Irbit (to the fair) and further, along the systems of the Irtysh and Ob rivers, or along the old Siberian highway, into the region. But since 1897, upon opening of traffic in the Central Siberian section, the indicated import route through Perm has gradually been left aside, now serving only for transportation of bulky items and such goods and products that do not require urgent



delivery to their destinations. In view of this, in order to clarify the future position of Siberian imports, one should first compare the tariff rates established for the Siberian railway with the freight charges that will take place for the Northern Trade Route. For greater clarity and simplification of calculations, the table below shows the totals of expenses only for three most profitable (shortest) directions of the routes under consideration, between St. Petersburg and Moscow, on the one hand, and the Ob and Irkutsk stations, on the other.¹⁷ In addition, in order to facilitate various commercial combinations, the cost of transporting goods imported to Siberia is determined by the classes of their tariff differentiation, which was put into effect on January 1, 1901 (Fifth ed.).

Table of freight charges from a pood in kopecks.¹⁸

From this comparison of freight charges, it is not difficult to draw a conclusion about the significance of the Northern Trade Route for Siberian imports. Bearing in mind that, in addition to some manufactured goods and weaving, sugar and granulated sugar, groceries, tobacco (shag), candles, kerosene and oil residues, cement and some other materials, most of the goods needed for Siberia are delivered there already now from abroad, through St. Petersburg, Moscow and Chelyabinsk, and that this import (and at the same time export) for goods of the first eight classes for 132 to 11 kop. from a pood will be cheaper if it is sent

through the Varandey port,¹⁹ it will become even clearer that the predominant influence that implementation of Polar-Ural railway should have for development of not only Western and Central Siberia, but also the areas adjacent to them.

Having caused in this case beneficial competition in the foreign trade of Siberia, this influence will be expressed, first of all, by *cheaper* necessities for the local population, including *agricultural tools and machines*, without which the future success of agriculture is inconceivable, and at the same time cultural development of the country.

But this will not be the *only* task of the projected path: it will no less serve *to awaken and develop the productive forces of our North*, both from European Russia and from Western Siberia. In this regard, *the facilitation and cheapening*, through this path, of *importing* the most necessary auxiliary shells and devices for developing the wealth of the *plant and fossil* kingdoms²⁰ that are still untouched and for streamlining the *animal and fisheries* will immediately revive the entire polar North, which, in turn, will also affect increase in imports.

Based on data borrowed from the operational reports of the Siberian Railway,²¹ the number of goods *imported* to Siberia along this route reached 18 million poods in 1902²²; but in view of the fact that the size of imports is directly proportional to the purchasing power of the region, which, as you know, depends mainly on the more or less facilitated and secure sale of local agricultural products (bread and livestock products), we can hope

¹⁷ Namely, along the lines: 1) St. Petersburg–Moscow–Penza–Ruzaevka–Chelyabinsk–st. «Ob» and Irkutsk; 2) Moscow–St. Petersburg–Varandey port – st. «Sob» and st. «Ob»; 3) from St. Petersburg and Moscow, through Varandey to the station «Sob», then along the Ob and Chulym to Achinsk and further along the Central Siberian Railway, through Krasnoyarsk to Irkutsk.

¹⁸ The following individual rates have been taken into account:

a. for transportation of goods along railway lines – the current tariffs, according to the length of the lines;
b. additional charges – 1,23 kop. from a pood, for each continuous route of cargo along railways, with the exception of Polar-Ural, for which the indicated costs are replaced by a general «forwarding fee» of 1,75 kop. from a pood, for all cargoes, except for grain (see pr. 2 in No. 33 «Zheleznodorozhnoe delo» this year on p. 195);
c. sea freight from St. Petersburg to the Varandey port – 10 kopecks, and hand freight: from st. Sob, up the Ob to st. «Ob» – 8 kopecks; from the same st. «Sob» to Tomsk – 9 kopecks, and to Achinsk – 10 kop.; finally,
d. the total port charge for voyages between St. Petersburg and the port of Varandey, on average, is 4 kopecks.

¹⁹ The difference in the cost of transporting goods imported into Siberia will actually be incomparably greater if we take into account the indirect costs associated with freight traffic along long railway lines. Not to mention the frequent and prolonged stagnation of cars inherent in transportation along such lines, accompanied by frequent damage to goods, the main reasons for the increase in the cost of transportation are that delivery times become extremely uncertain, as a result of which not only interest on costs capital, but the trading combinations themselves are subject to great changes.

²⁰ Forests and forest subblocks; metals and ores (loose gold, silver, copper, lead, manganese and iron ores, etc.); graphite; coal oil, etc.; See A. A. Dunin-Gorkavich «Tobolsk North». 1904; N. Podrevsky. «About a trip to the Northern Urals in the summer of 1892» (According to the diaries of Syromyatnikov and Andreev); and V. S. Reutovsky. «Mineral resources of Siberia». St.Petersburg, 1905.

²¹ Stat. M-va P. S. Vyp. 84, 1904, tab. III, p. 33.

²² Starting from 2,5 million poods in 1897 – the time of traffic opening.

that with the opening of Polar-Ural railway of correct movement and in attention to the above considerations, the number of annual imports along the designated route will be at least 6 000 000 poods²³ in the very first years of operation.

Summing up all of the above, the cargo turnover of the road will be obtained in the following form:

1. *For the export of Siberian products.* All *exported*, in the near future, cargo was meant, from 65 to 70 million poods per year. Such a figure, however, as experience on other roads shows, can only be achieved after 4–5 years, while from the first year of traffic opening, the export will most likely be less. In view of this, only 24 000 000 poods are entered into the calculation so far.²⁴

2. *On the import of goods and products.* The quantity of *imported* goods is set above in such a moderate amount that there is no reason to assume that it will not take place in the first year of operation.

Thus, in both directions of movement, only 30 000 000 poods of cargo are taken into account.²⁵

²³ Very interesting data on the future foreign trade of Siberia are given in the Russian-English Mining Bulletin for 1900 by N. G. Hudson, who traveled around Siberia as a representative of the Ermak company.

²⁴ The carrying capacity of the railway, i. e., the number of stalls, rolling stock and workshops, should be equated to this quantity of export. Taking into account, however, that the influx of goods on the road can increase rapidly, its carrying capacity is calculated at 40 mln poods per year in one direction.

²⁵ The following official statistics on movement of goods along the Siberian Railway can serve as evidence that this figure cannot be considered exaggerated and, on the contrary, is rather below the probable norm:

Transported, of which bread, gr.

in 1897 21 078 000 pood 13 739 000 pood

« 1898 « ... 37 027 000 « 19 825 000 pood

« 1899 « ... 40 004 000 « 18 735 000 pood

« 1900 « ... 42 841 000 « 17 452 000 pood

« 1901 « ... 50 590 000 « 20 972 000 pood

« 1902 « ... 63 379 000 « 23 504 000 pood

« 1903 « ... 64 293 000 « 19 587 000 pood

« 1904 « ... 65 221 000 « 24 583 000 pood

The growth of cargo (transit) traffic along Rybinsk-Pskov line is even more vivid. This line connects, as you know, the Volga with the Baltic Sea (Riga), which had no direct connection until 1897, that is, before construction of Bologoe-Pskov section, did not exist. Since the same year, the total amount of cargo transited between Rybinsk and Pskov is expressed in the following figures, borrowed from the annual reports of the board:

in 1897, total ... 418 000 pood

« 1898 « ... 13 920 000 pood

« 1899 « ... 16 415 010 pood

« 1900 « ... 21 087 000 pood

Conditions for its implementation. Turning to the analysis of the economic side of the enterprise and the results that can be expected from the operation of Polar-Ural Railway, it is necessary to touch first on the conditions with which its implementation is associated.

The projected railway will *stand out sharply* from a number of existing rail communications, not only because of its geographical location, but also because the conditions for its operation will be *completely different* from those of other railways.

Above, a general description of its significance was given, as well as the impact that it should have on the vast region of Western Siberia with the adjacent regions: Semipalatinsk and Akmolinsk and Berezovsky districts of Tobolsk province, and it was also indicated that its mission, as link of an outstanding transit route, will be closely connected not only with the needs and requirements of the ever-increasing endowment of Siberia in its central parts, but also with the tasks of world trade. As for its proper *local* significance, in this respect it will be in a *completely exceptional* position, since it does not foresee either *internal commodity* or *mandatory* (daily) *passenger* traffic. Such a distinctive property, however, will not serve it to the detriment; on the contrary, being in this case a natural consequence of the everyday nature of the polar countries, it will deliver *high advantages* to the projected route over other rail communications. These benefits will include:

1) *With regard to construction of the railway itself:*

a) in the comparative *cheapness* of the economy of its construction (53 thousand rubles per ver.), since it will not require the construction of *passenger buildings* at all, with all their diverse furnishings, and at intermediate stations – *nor goods platforms, warehouses and other structures* caused by local traffic, – *nor long sidings* (with the exception of *one* siding at each stopping point), nor, finally, *complex* signaling devices;

b) in *reducing the number* of intermediate stations and sidings, as well as rolling stock, which will consist mainly of cargo cars and steam locomotives of the latest type.²⁶

2) *With regard to operation:*

a) in *simplifying* it, reducing station manipulations and the number of employees to *an extreme* (reasonable) *minimum*;

²⁶ Thus, cargo cars are assumed to have a carrying capacity of 37 tons = 2 296 poods and a container of 17 tons = 1 055 poods, and in total in laden state 54 tons = 3 350 poods, as a result of which their number is relatively limited.



b) in *reducing the time trains stop* at stations and sidings, which, in turn, will *speed up* the circulation of trains and, therefore, lead to a *more rational* use of rolling stock;

c) in *increasing the profitability* of railways, separating out of operation low-income, if not unprofitable in most cases, items: *regular* passenger and *local* goods traffic; finally,

d) in the *most perfect* utilization [effective use – ed. note] of the route itself, transportation of goods along its *entire* length of 400 ver., both in *one* direction and in the *opposite* direction.

As seen further from the design data, the construction of Polar-Ural railway in the direction that is now planned for it, namely: from the confluence of the river Sob to the Bolshaya Ob, through the so-called Yelets watershed, to the Varandey port, will not be associated with any *special* difficulties; its maximum slopes will not exceed 0,008, with the smallest radius of curvature of curves being 300 sazhen; the line itself will run, for the most part, across flat polar tundras, which represent an excellent, in terms of construction, and completely *reliable foundation* for construction of the road surface; there are relatively *few* artificial and other linear structures; finally, the prices for building materials are generally moderate. С приданием же верхнему строению пути крайне *солидной* конструкции (с рельсами вес. 24 фун. в п. фута и со скреплениями новейшего американского типа «*con*With the track superstructure being given an extremely *solid* structure (with rails weighing 24 pounds per foot and with fastenings of the latest American «*continuous joint*» type, 2000 crossbars per verst of track and using ballast made of *crushed stone*, thickness layer of 0,22 sazhen), the above-mentioned advantages will become even more important and will undoubtedly have a beneficial effect on the entire economic structure of the rail service under consideration.

On the other hand, the projected the road will require a number of additional structures and facilities, caused both by its geographical location and the conditions of its future operation. These buildings and facilities include:

1. *Mooring* and various *transshipment* devices at terminal stations at the commercial seaport and river harbor, as well as various mechanisms included in them; steamships, barges, boats and other accessories of the port and harbor; finally, *the inventory* necessary for local workers' artels, etc.

2. *Elevators* at the end stations, with all related equipment for drying, cleaning and sorting, as well as the speedy reloading of grain and various seed products.

3. Construction of *two electric stations* both for driving the mechanical drives of elevators, cranes, etc., as well as for lighting terminal stations and settlements, supplying energy to electric trams, and for other needs.

4. The arrangement of *wire* and *wireless telegraphs*, in connection with telephone communications between the Varandey port and the village Ust-Tsylma, on Pechora,²⁷ and st. «Sob» and the village Samarovsky (at the mouth of the Irtysh)²⁸ in order to connect the projected road with a network of Russian and foreign telegraph lines, as well as to streamline river navigation along the Ob.

5. The construction of *two settlements* at the end points of the road, both for the needs of the local administration and its diverse institutions, and for the convenient accommodation of employees and workers, not only railway, but also those of the future customs and other departments and various persons involved in the case.

Finally, the construction of the Varandey commercial port itself and the Sobskaya river harbor should also be included among the additional accessories of the trade route under consideration. These structures, as not directly related to the railway enterprise, in connection with the construction of the future customs house and with all other accessories of the port and harbor, are not included in the cost sheet for the railway construction, but are subject to a special agreement with the government.

Cost sheet results. Based on the cost sheet, what is actually required for construction of Polar-Ural railway construction capital is determined at 21 **200** 000 rubles, which will amount to 53 000 rubles per verst.

The following is also added:

1. for various station unloading facilities, for acquisition of inventory property of the port and harbor and for construction of river piers – 3 000 000 rubles.

²⁷ From here runs the postal route through Pinega to Arkhangelsk, along which, since 1895, Ust-Tsylma has been connected by telegraph wire to the general network of the Empire and to the foreign one.

²⁸ This point is already connected to Tobolsk and therefore also belongs to the general telegraph network.



2. for construction of elevators – 4 000 000 rubles

3. the same – of electric stations – 800 000 rubles

4. the same – of telegraph and telephone messages between terminal stations, Ust-Tsylma and the village Samarovsky – 500 000 rubles

5. for construction of two settlements – 2 800 000 rubles

Total 11 100 000 rubles

6. working capital – 500 000 rubles

7. for payment of interest and repayment of capital on bonds during 3½ years of road construction – 2 700 000 rubles

8. expenses for setting up the enterprise and selling construction capital and interest on shares during the execution of work – 4 500 000 rubles

Total – 40 000 000 rubles

or per verst of a road – 100 000 rubles

This capital is meant to be realized:

a) through issuance of 20 000 shares, adv. priced at 500 rubles each, for the total amount – 10 000 000 rubles;

b) issuance of 120 000 pcs. of *non-government guaranteed* bonds, from 5 % interest and redemption, adv. priced at 250 rubles each for – 30 000 000 rubles.

Total – 40 000 000 rubles.

It remains to be added that the above considerations and conclusions are based, among other things, on detailed surveys carried out in 1900, both for selecting terminal points²⁹

²⁹ As stated above, in the first year after traffic opening, it is planned to transport only 24 million poods of sold cargo. Attributing 60 %, i. e. 14 400 000 poods, to the share of grain products, timber, metals, etc. of cargo, their freight charge can be accepted at 1/45 kopecks per pood-verst, while for the rest 9 600 000 poods it will be 1/24 kopecks per circle. This will correspond, for the entire distance, to a fee of 9 and 17 kopecks. Adding to these rates an expedition fee of 1,50 and 1,75 kopecks (see Appendix 4), the full freight charges will be: 10,50 and 18,75 kopecks for a pood.

and establishing the general direction of Polar-Ural railway, as well as clarification of economic conditions of its construction, and that, thus, there is already solid ground for approaching the issue under consideration with complete objectivity, without which a successful undertaking and, moreover, implementation of such a serious enterprise is unthinkable, as upcoming.

Financial results of operation. According to the above considerations and data, the expected operating cash flows will be presented in the following form:

Gross income.

1. Revenue from transportation along a road 400 versts long:

a) cargo sold⁴, namely: various grain cargoes, timber, coal etc.

14 400 000 p. x 10,50 kop. = 1 512 000 rub.

other exported goods,

9 600 000 p. x 18,75 kop. = 1 800 000 rub.

b) cargo imported,

6 400 000 p. x 28,75 kop.³⁰ = 1 725 000 rub.

Total from transportation of 30 mln poods – 5 037 000 rub.

2. Various additional income³¹ – 250 000 rub.

³⁰ The indicated cargo is taxed at 1st to 7th class general tariff, i. e., kr. ch., 1/15 kop. from pood-verst, which, for the entire distance, will be: 27 kop. + 1,75 kop. = 28,75 kop.

³¹ This mainly includes: 1) fee from transportation on service trains: passengers, luggage, parcels and high-speed goods; from piece transportation; for transportation of mail and military luggage; from animals, etc. (60 000 rub.); 2) various items of income: for the use of water supply, commodity platforms, station yards, tracks, etc.; for the rental of premises and land; collection from line telegraph; income from the sale of old property and other income (50 000 rub.); 3) income from financial and additional turnover and enterprises (40 000 rub.); 4) income from taxing business transportation (80 000 rub.), and 5) income from telegraph and telephone communications on a new line (20 000 rub.), – total 250 000 rub.



3. Income from processing goods through elevators and from other mechanical manipulations:

14 400 000 p. x 2,00 kop. = 288 000 rub.

Total – 5 575 000 rub.

4. Telegraph fee from side lines (Varandey–Ust-Tsilma and Sobol–Samarovo – 40 000 rub.

Total – 5 615 000 rub.

per verst – 14 037,50 rub.

Expense.

Such, in fact, for *operation of the road*, is accepted for a circle of 50 % of the gross income³² (except for the telegraph fee from side lines) and therefore will be:

5 575 000 rub. x 0,50 kop. = 2 787 500 rub.

For maintenance and repair of station reloading devices at the end points of the road, river piers, as well as side telegraph lines – 200 000 rub.³³

total – 2 987 500 rub.

per verst – 7 468,75 rub.

Net income.

Total 5 615 000 rub. – 2 987 500 rub. = 2 627 500 rub.

per verst – 6 568,75 rub.

Net income distribution.

³² This amount of total expenses cannot be considered, in this case, to be underestimated if we take into account not only the economic structure of the operation of Polar-Ural railway – especially its traffic and traction services, with relatively limited personnel, due to the exclusion of regular passenger and any local traffic from the range of its activities – but also other extremely favorable conditions inherent in the route under consideration: the possibility of the most intensive utilization of rolling stock by transporting sold and import cargo along the entire length of the road; moderate cost of maintaining and repairing the track, due to the solid design of the latter and other road structures; comparative cheapness of main building materials and fuel; finally – and special emphasis should be placed on this – the complete isolation of the road in question and, therefore, its independence from many factors that constrain the economy of other railways. The fact that consumption is not underestimated is confirmed by direct calculations. From the reporting data of operated Russian railways (Stat. collection. Min. p. s. 1904, issue 85, p. 37) it is seen that the average total of expenses for 1900–1904 was per 100 train-verts of all roads kr. ch., – 140,40 rub., and the Siberian railway – 169,50 rub. For Polar-Ural railway, with an annual transportation of 30 million poods, the sum of all train verts will be equal to 1 108 800. Dividing the total expense accepted above – 2 787 500 rubles by the latter value, we get 251,40 rubles per 100 train-verts, or only 35,55 % of the gross income, i. e. the rate is incomparably more profitable than on all other railways. It remains to be noted that on American roads operating costs for goods traffic, amounting to 45 % of gross income in 1897, dropped in 1902 to 40 %. (Report by engineer E. E. Nolte, board Moscow-Kazan railway, 1902).

³³ Of these, the actual maintenance and repair of station unloading devices, inventory property, etc. – 100 000 rubles and the same amount for maintenance of side telegraph lines.

To pay 5 % of interest and repay capital on bonds in the amount of 30 000 000 rub. – 1 500 000 rub.

To reserve capital (10 % of net income):

2 627 500 rub. x 0,10 = 262 750 rub.

total – 1 762 750 rub.

therefore *the remainder of the net profit* will be:

2 627 500 rub. – 1 762 750 rub. = 864 750 rub.

and for 10 mln rub. of share capital – 8,65 %.

If such a result, from the very first year of traffic opening along the railway, deserves attention, especially given the caution of the tasks that are the basis of the calculations, then there is a reason to assume that, with an increase in traffic, the net income of the road will also increase over time, and thus shipping along the Siberian waterways and the North Sea will sooner and more successfully develop, in connection with the expansion of the commercial sea port (in Varandey Bay) and the Ob harbor, with unloading facilities in them.

On the issue of construction of a seaport and river harbor at the final points.

It was indicated above that the number of additional structures and works caused by the local conditions of the future operation of the rail track in question also includes the construction of a seaport in the Varandey Bay of the Arctic Ocean, and at the opposite end of the road, at the confluence of the river Sob in Bolshaya Ob, a manual harbor.

These capital structures were not included in the cost sheet of Polar-Ural railway on the grounds that they are necessary not only for the needs of a private enterprise, but, mainly, for development of shipping and trade in the north of Russia, and therefore these structures have the character of national buildings, erected, in most cases, by the government itself.

Under normal conditions this would probably be the case in the present case; However, taking into account the current financial situation of the state, and on the other hand, the impossibility of carrying out the correct operation along the indicated route, without supplying it, at the same time, with such devices that would ensure the unimpeded export and delivery of cargo by water, there remains only one outcome: to leave the implementation of the said structures also to private initiative.

It is clear that the significant monetary costs required for this cannot be attributed to the construction capital of Polar-Ural railway, since the corresponding sums are intended exclusively

for construction of a rail track, with all the already numerous additional structures and facilities,³⁴ while the seaport and river harbor, to which, perhaps, a customs office will be attached, are the essence of government³⁵ buildings, subject to construction using special resources.

It is most correct to include the so-called port revenues to such resources, namely: the by-product tax on all cargo passed through the seaport, and the ship tax – from each of the ships arriving at the port and departing from it. These fees, levied since 1902 in all ports of the Empire on the same basis and at equal rates, are now: first, that is, by-product – from 0,25 to 1,00 kopecks and ship – per circle 2,50 kopecks or in complexity – from 2,75 to 3,50 kopecks, per a pood. With an increase in the by-product fee for the port of Varandey by 0,50 kopecks, the average port dues will amount to kr. ch. 3,50 kop..³⁶

Since at present it is impossible to determine with accuracy the cost required for construction of a sea commercial port and river harbor, i. e. the cost of dredging work, as well as jetties, unloading dams, docks, lighthouses, etc., is equal to the cost of various facilities, like that; dredging machines and dredgers, steamships, barges, ice cutters and other equipment and accessories of the port and harbor, except for those already included in the cost sheet for the needs of the railway – then the said expense is set for now at 10 million rubles, inclusive of administration costs and deductions for payment, during production of work, interest and repayment on the capital expended. Taking the port income as kr. ch. at 3,50 kop. per pood, and the average cargo turnover is 30 million poods, the gross port dues will be at least 1 000 000 rubles per year.

Under such conditions, the Society of the Polar-Ural Railway, with the assumption of the structure of the seaport and river harbor, it will be possible – without burdening the state

budget – to erect and equip the said structures *simultaneously* with construction of the railway, which, in this case, is not only *desirable*, but also an *indispensable* condition for implementation of the enterprise in question, since otherwise proper operation would be impossible.

It remains to be added that, in accordance with the above, the reporting on performance of the relevant work and related expenses should be separated from that on construction of the railway; but, in order not to burden the progress of work with unnecessary formalities, it would seem most appropriate to provide the Society of Polar-Ural Railway with preparation of detailed projects and estimates for construction of a seaport and river harbor, and after their consideration and approval by the government, grant the Society of Polar-Ural railway the right to independently dispose of established loans, on a par with production of expenses for construction of the railway itself, so that the amounts intended for the port, harbor and their accessories are not at all used for extraneous needs.³⁷

The closest definitions on this subject, including the procedure for collecting port dues, should be stipulated in the Society's charter or set out in a special addendum to it.

Memorandum by mechanical engineer E. K. Knorre, presented to the Minister of Railways.

Here is its content, which explains both Mr. Knorre's attitude towards Mr. Golokhvastov and Mr. Golokhvastov's attitude towards this case

«Referring to our repeated petitions for permission to construct a public railway between the Samoyed coast of the North Sea and the mouth of the river Sob and also taking into account the very important importance of this line, especially at the present time, when it could provide the state, even before its complete completion, with a great service by facilitating military transport from the Far East to European Russia, providing many thousands of workers with reliable income and development of resettlement in Siberia, the undersigned allows himself to again disturb Your Excellency with a respectful request for possible assistance in the speedy implementation of this route of communication».

³⁷ This procedure has already been applied during the expansion of the port of Riga, work on which was carried out and continues to be carried out mainly by order of the local exchange committee.

³⁴ As can be seen from the cost sheet, the cost of constructing the railway itself will not exceed 53 000 rubles per verst, while additional buildings, facilities and expenses are expected to be in addition 11 100 000 rubles, or per verst – 27 750 rubles, i. e. 50 % of the construction cost of the road.

³⁵ The desirability of having a maritime stronghold on the Samoyed coast has been repeatedly expressed, both for development of our fishing and animal industries, and for facilitating sea expeditions to explore the North of Siberia. In these respects, the Varandey port will be of outstanding importance, especially if we take into account its proximity to the mouth of the Pechora and the Kara Sea.

³⁶ See note 1 on page 228 in «Zheldor. Delo» of this year No. 37–38.



«Expecting, even in the current state of the money market, to sell construction capital without any guarantee from the government, the undersigned is limited to requesting only the right to duty-free import from abroad of the building materials and accessories required for construction of the road, based on the same privilege, Your Highest granted to Mr. Golokhvastov. Further basic definitions of the company's charter do not differ at all from the conditions established for other private railways of the Empire».

«Based on the surveys performed in 1900 by the engineer Gette, the cost of the enterprise was determined, with all the caution of the assignments, in extremely moderate amounts: the railway track itself, 400 versts long, is estimated at 51 thousand rubles from a verst away (total 20 400 000 rubles); with the cost of port facilities, elevators, power stations, telegraph communication with the village Ust-Tsylma and Tobolsk and construction of roads in two settlements at the end points will require 75 425 rubles per verst, and in total with expenses for exchange rate losses and the payment of interest on bonds during construction of the road – 36 million rubles. At the same time, the throughput capacity of the designed line is designed for 120 million poods per year, and carrying capacity – by 40 million poods».

«To this, the undersigned allows himself to add that the subsequent, for the fourth time, by virtue of the Highest permission, extension of Mr. Golokhvastov's right to construct and operate the Ob railway of private use due to the submission of survey results by April 2, 1906; and since Mr. Golokhvastov, after 18 years of inactivity, has still not begun to carry out this research, then – as his last petition proves – he will in no way be able to fulfill his obligations by the specified time, exactly just as it happened before».

«Meanwhile, with the start of necessary activities this fall, the Polar-Ural Railway Society of public use being formed would have the opportunity to use the entire working period of the next year, both for carrying out final surveys, with surveying and studying the corresponding part of the Samoyed coast, and for building settlements, laying telegraph lines, etc., without which it would be impossible to open construction works, with a full guarantee of their successful execution. «Adding to this:

1) that the proposed Ob route for private use cannot be of significant interest either for the state or for trade in Siberia, since it excludes the possibility of using it by anyone except the owner, and 2) that the permission granted to Mr. Golokhvastov for construction of a private road does not deprive the Government of the right to issue a concession for construction and operation of routes parallel and competing with the first, – as stipulated in the first permission given to Mr. Golokhvastov for implementation of his enterprise – the undersigned humbly request Your Excellency not refuse to equalize the rights of all persons involved in the matter, by asking the Highest Sovereign Emperor for permission to allow him to form the now private Society of Polar-Ural Railway and, upon approval of the Society's charter in a legal manner, then begin work».

The last memorandum dates back to the time when the prince M. I. Khilkov was the minister. The benefits that E. K. Knorre asks for in this note were recognized as possible and expedient by the Commission on New Railways in March 1907 (see Zhel.-dor. Delo of this year, p. 214), i. e. already under the second successor of the late prince. The current Minister of Railways, St. Secret S. V. Rukhlov, in respect of the works of P. E. Gette, provided powerful support to his widow, Mrs. Gette, according to the accounts of the State Control. From these facts we can obviously conclude that both the personal works of P. E. Gette and those joint with E. K. Knorre, in their common cause, received sympathy from the government, and if the concerns of these highly respected entrepreneurs were not realized in reality, then the failure of their project for Polar-Ural railway must be sought outside of them – in the obstacles caused by their competitor, Mr. Golokhvastov, who did nothing seriously to draw up his project and only abused the Most High favors granted to him for delays. It remains to sincerely wish that such persons would not appear in the railway enterprise, that fate would finally allow E. K. Knorre to carry out his Polar-Ural business, and that even the note published [in the journal] about steamship routes in the northern waters would serve him, if possible, to his benefit.

**«Zheleznodorozhnoe Delo», 1912,
Iss. 33 pp. 194–196, Iss. 37–38 pp. 227–230,
Iss. 40 pp. 239–243 ●**

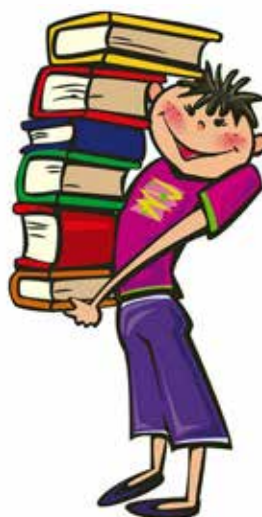


**SELECTED
ABSTRACT
OF D.SC. AND PH.D.
THESES**

292

- *Improving urban transport systems in Iraq.*
- *Forecasting the safe operation of cargo wagon wheels using fracture mechanics methods.*
- *The influence of low temperatures on the rigidity of rail fastening units of a ballastless track structure.*
- *Transport and information space under the conditions of cluster development of the market for complex transport services.*

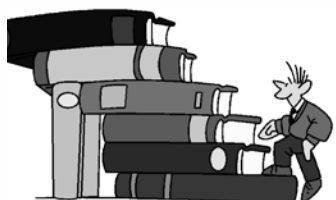
BIBLIO-DIRECTIONS



**NEW BOOKS
ON TRANSPORT
AND TRANSPORTATION**

296

New editions released by Russian publishing houses and universities.



SELECTED ABSTRACTS OF D.SC. AND PH.D. THESES SUBMITTED AT RUSSIAN TRANSPORT UNIVERSITIES

*Selected abstracts of D.Sc. and Ph.D. theses submitted
at Russian transport universities*

*The text in Russian is published
in the first part of the issue.*

*Текст на русском языке публикуется
в первой части данного выпуска.*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-14>

ABUJWAID Hussam Abbas Mohsin. Improving urban transport systems in Iraq. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Sovershenstvovanie gorodskikh transportnykh sistem Iraka. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2023, 19 p.

The development of any city largely depends on improvement of urban transport systems (UTS). International experience highlights the importance of developing and regulating public transport sectors as they play a vital role in various aspects of modern life. Social and economic activity increasingly depends on development of transport services to meet the transportation needs of individuals.

The relevance of the work lies in the need to improve the hydraulic system of Iraq. Research on hydraulic structures in Iraq is few and insufficient. There is a fundamental problem associated with planning transportation by public transport due to the increase in population due to its annual growth of 2,5 %, high demand for transportation, significant urban population growth and widespread use of personal vehicles. Since 2003, the number of private vehicles has increased by 122 %. In addition, there are seasonal transport problems due to the influx of tourists in some Iraqi cities such as Karbala and Najaf.

The purpose of the study was to develop a methodology for improving the structure of the road network and urban transport system, ensuring the efficiency of their functioning in the cities of Iraq.

The characteristics of Iraqi cities are analysed and studied: population size and density, city areas, level of motorization, maximum extent of territory. Based on the analysis of the modern functioning of transport systems, the classification of cities was clarified, considering the specifics of Iraq.

An analysis of research on the selection of types of urban public transport (UPT) was carried out and a classification of rolling stock capacity rows and UPT options for Iraqi cities was developed, the volume of transportation for each type of rolling stock was calculated as a percentage, rows of rolling stock capacities were selected, and the volume of traffic per each type of rolling stock was calculated.

The boundaries of the intervals of average intensity of passenger traffic for groups of cities in Iraq have been adjusted, which allows selecting the type of UPT vehicle and its share of traffic for each type of rolling stock.

A comprehensive assessment of efficiency of transport systems in modern conditions was conducted based on economic, social, and environmental indicators, and a block

diagram of an algorithm for determining economic, environmental and social effects was developed.

As a result of calculations of economic, environmental, and social indicators for the cities of Iraq, it was noted that these indicators are not effective enough and it is necessary to improve the road network, therefore possible options for improving the structure of the urban network were considered.

The analysis of research on improving the topological structure of urban transport networks was conducted. An algorithm is proposed for planning the connectivity and efficiency of the road network using indices based on topological characteristics.

A comprehensive methodology has been developed for improving the Iraqi UTS, which includes four stages. At the first stage, the main characteristics of cities are justified and determined, as well as the division of trips by time, needs and services. At the second stage, a comprehensive assessment of the efficiency of transport systems in modern conditions is conducted according to economic, social, and environmental indicators. At the third stage, the type of UPT is selected. At the fourth stage, the structure of transport networks is analysed and improved. The first three determine the methodology for choosing a mode of transport, and the fourth – improving the structure of transport networks.

Recommendations have been developed for development of the transport network of the city of Najaf. For this city, justification and selection of types of UPT safety standards are presented, and studies have been conducted to assess the effectiveness and improvement of the street road network. A topological map of the city was developed, based on which an assessment of the connectivity and efficiency of the street-road network was calculated and recommendations for its improvement were developed.

It is recommended to increase the share of public transport and when choosing types of UPT, to consider not only economic indicators, but also environmental and social ones.

Prospects for further development of the topic are in the area of developing Iraqi urban systems and opening prospects for cooperation in this area between Russia and Iraq and are also associated with improving the methodology for designing urban transport systems.

2.9.1 – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Chunin, V. V. Forecasting the safe operation of cargo car wheels using fracture mechanics methods. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Prognozirovanie bezopasnoi ekspluatatsii koles gruzovykh vagonov metodami mekhaniki razrusheniya. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2023, 24 p.

The analysis of operating conditions and failure statistics of railway wheels shows that the strength criteria specified in the current standards cannot fully guarantee their failure-free operation; there are no requirements and, accordingly, methods for assessing the stage of crack development. If the viscosity of the metal is insufficient and its sensitivity to stress concentrators is high, a fatigue crack may begin to propagate up to its critical length, which is dangerous due to the possibility of brittle fracture of the wheel due to the influence of seasonal factors.

At the design stage, wheel developers do not predict the stage of development of fatigue cracks before the onset of the limit state. As a rule, the time between repairs of a car is established based on the period of maintenance of parts and assemblies and does not consider the survivability of the main load-bearing elements. For example, with an increase in axial load and the use of new materials and structures, the likelihood of fractures increases.

Currently, the issue of the possibility of using cast wheels in Russian railways is being actively discussed. But considering that the technology for production of cast wheels does not imply multi-stage hot deformation, and the formation of the wheel is conducted by casting metal under pressure into a mold. This manufacturing technology causes a number of differences in the properties and quality of the metal of cast wheels compared to solid-rolled wheels.

Thus, to eliminate possible risks, there is a need to develop a unified methodology for assessing the stage of crack development from dynamic influences in operation, conducting studies of the behaviour of wheel metal when the temperature drops to -60°C , and determining the degree of change in properties and fracture parameters. Based on the results, indicators that affect the safe operation of the wheel must be determined, and their minimum acceptable values for Russian operating conditions must be obtained.

The purpose of the study is to ensure safe operation of the car by predicting its mileage after the occurrence of a fatigue crack in the wheel disk before it breaks, by determining scientifically based requirements for overhaul intervals.

The analysis of regulatory, scientific, and technical documentation showed the absence of requirements and, therefore, a lack of methods for assessing survivability of wheels, as well as taking into account low climatic temperatures, at which the mechanical properties of the metal of the wheels change and the rigidity of the track increases. To ensure safe operation, it has been established that it is necessary to predict the mileage of a car after a crack occurs in the wheel, especially with an increase in the axle load to 27 tf, a reduction in the tare weight of cars by 25 % and the use of new materials and structures.

The studies have shown that the most dangerous are wheel metal defects located in the zone of maximum operational stress amplitudes, which with a certain probability may not be detected by NDT, which will lead to crack growth, bypassing the stage of accumulation of fatigue damage and accelerated destruction.

Experimental tests of standard samples cut from wheels manufactured using different technological processes and from different steel grades for a cast wheel made from AAR B steel, and for a solid-rolled wheel from grade 2 steel showed that the characteristics of the cyclic fracture toughness of metals differ: for solid-rolled steel wheels at a temperature of 20°C are higher than for cast steel, but when the temperature drops to -60°C the values become comparable.

The analysis of methods for assessing the strength of car wheels showed that when testing using the circular bending method, their loading is closest to the operational one. Experimental survivability curves were obtained, and the number of cycles before failure of solid-rolled and cast wheels was 8,1 and 1,0 million load cycles, respectively.

A virtual model of a stand for testing wheels by circular cyclic bending has been developed for numerical modelling of development of a crack in the disk of cast and solid-rolled wheels from the initial defect to calculate the SIF values,

according to which the need to estimate the moment of crack starting and breaking of the wheels is justified based on the *KI* values at the crack front corresponding to type I opening.

A dynamic model of a cargo car with an elastic wheel set has been developed, with inertial, rigidity, elastic-dissipative and geometric parameters corresponding to the vehicle of the cargo car. According to the results of running dynamic and strength tests, the model has satisfactory convergence in terms of dynamic indicators and adequately describes car movement in operation. The proposed methodology makes it possible to determine the SSS of a cargo car wheel set, evaluate the strength, service life and survivability of various designs of axles and wheels, and can be applied at the design stage to predict the period of development of a crack in a wheel in order to ensure its safe operation.

Based on the modelling results, summary diagrams of distribution of dynamic stress amplitudes versus the frequency of their occurrence in cast and solid-rolled wheels were obtained. The survivability of cast and solid-rolled wheels in operation, that is, the growth of a crack from an initial defect to a fracture at a temperature of 20°C was 944,2 thousand km and 671,8 thousand km, and at a temperature of -60°C – 283,8 thousand km and 669,6 thousand km, respectively.

For safe operation of cargo cars, it is proposed to set the minimum allowable safety factor for wheel survivability to 2,0. Thus, safe operation of a cargo car with cast wheels will be ensured over a time between overhauls of 110 thousand km, with a survivability safety factor of 2,58, and with solid-rolled wheels – 210 thousand km, with a survivability safety factor of 3,19.

The results obtained can be used to establish requirements for the overhaul intervals of cargo car wheel sets.

Further research prospects may be related to the issue of clarifying the requirements for the sensitivity threshold of NDT methods used to detect wheel defects.

2.9.3. – *Railway rolling stock, train traction and electrification.*

The work was performed and defended at Russian University of Transport.

Petrov, A. V. The influence of low temperatures on the rigidity of rail fastening units of a ballastless track structure. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Vliyaniye nizkikh temperature na zhestkost uzlov relsovykh skreplenii bezballastnoi konstruktzii puti. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2023, 24 p.

The development of high-speed railway traffic in our country involves construction of new dedicated railway lines for high-speed railway traffic. The most promising at present is the high-speed rail (hereinafter HSR) «Moscow – St. Petersburg» with speeds of up to 400 km/h. All high-speed rail projects involve the use of new technological and engineering solutions that ensure the highest level of reliability and safety of passenger and cargo transportation, which will provide the necessary comfort for passengers.

World experience in construction and operation of high-speed lines has confirmed the effectiveness of using ballastless track design (hereinafter referred to as BTD). For example, development of Moscow–Kazan HSR project implied the use as a base of a ballast-free slab track structure CRTS III RUS, adapted to Russian operating conditions. It is known that in BTD, rail fastenings with an intermediate elastic layer are the main element, the elastic properties of



which form from 80 to 95 % of the elastic properties of the entire track structure as a whole. This is confirmed by field measurements of rail deflection under the influence of loads from rolling stock.

Foreign regulatory and technical documentation regulates the requirements for the elastic characteristics of rail fastenings with an intermediate elastic layer for BTB, considering the influence of low temperatures. The lower threshold test temperatures in German and Chinese standards are set at -20°C and -35°C , respectively. According to the requirements of the pre-design documentation for Moscow–St. Petersburg HSR line, for Russian operating conditions it is necessary to consider a minimum temperature of -50°C . Thus, the issues of improving the calculation model for determining the elastic deflection of the rail from the influence of rolling stock on BTB, taking into account the influence of low temperatures, with the subsequent formation of requirements for the elastic characteristics of rail fastenings with an intermediate elastic layer for BTB operating in the conditions of the designed HSR line Moscow – St. Petersburg when exposed to low temperatures down to -50°C ; and to adjust methods for confirming compliance with these requirements.

The purpose of the dissertation work is to determine the influence of low temperatures on the rigidity of rail fastening units of BTB operating under the conditions of the designed HSR line «Moscow – St. Petersburg».

The influence of low temperatures on the rigidity of BTB rail fastening units has been determined. The calculation model for determining the elastic deflection of a rail from the influence of rolling stock on BTB has been refined by introducing coefficients that allow considering the influence of low temperatures on the change in rigidity of rail fastenings with an intermediate elastic layer.

The coefficients of change in the static and dynamic stiffness of elastic gaskets made of EPDM and Byrel materials in a factory-made state in the temperature range from -50°C to $+50^{\circ}\text{C}$, obtained in laboratory conditions, were determined. It has been experimentally confirmed that with a decrease in temperature to -50°C for elastic gaskets made of EPDM and Byrel material, there is a corresponding increase in static stiffness by 2,11 and 3,57 times, and there is also a corresponding increase in the dynamic rigidity of elastic gaskets made of EPDM and Byrel materials by 17,54 and 9,06 times.

Tests were conducted on the Experimental Ring of JSC VNIIZhT to determine the deflection of the rail on a section of the ballast-free track designed by Feste Fahrbahn Boegl. The adequacy of the calculations is confirmed by satisfactory convergence with experimental data. The agreement between the calculated results and the experimental data was 94,8 %.

Additional requirements have been formed for the elastic characteristics of BTB rail fastenings for Russian operating conditions for sections of high-speed railway communication with speeds up to 400 km/h of the projected HSR line «Moscow – St. Petersburg», recommended for inclusion in GOST 32698:

- the vertical rigidity of the rail fastening unit must be within the range, kN/mm – 16–27.
- the change in the static rigidity of elastic gaskets operated at low temperatures (from -50°C to $+23^{\circ}\text{C}$) should not exceed a factor of – 4.
- the ratio of dynamic stiffness to static stiffness of elastic gaskets should not exceed the coefficient: at a temperature

of 23°C – 1,5; at a temperature of 0°C – 2,0; at a temperature of -10°C – 2,5; at a temperature of -20°C – 3,0; at a temperature of -30°C – 3,5; at a temperature of -40°C – 5,0; at a temperature of -50°C – 18,0.

Recommendations have been developed on methods for determining the elastic characteristics of a rail fastening unit with an intermediate elastic layer for BTB, considering the influence of low temperatures.

The prospect for further development of the topic is to conduct research into the operation of rail fastenings with an intermediate elastic layer of BTB at real speeds under loads from real high-speed rolling stock at a high-speed test site, which should become a section of Moscow–St. Petersburg HSR line.

2.9.2. Railway track, survey, and design of railways.

The work was performed and defended at Russian University of Transport.

Zubkov, V. V. Methodology for formation of transport and information space in the conditions of cluster development of the market for complex transport services. Abstract of D.Sc. (Eng) thesis [Metodologiya formirovaniya transportno-informatsionnogo prostranstva v usloviyakh klaster'nogo razvitiya rynka kompleksnoi transportnoi usluzhi. Avtoref. dis... dok. tekhn. nauk]. Yekaterinburg, UrGUPS publ., 2023, 48 p.

The development of the economy, in particular the digital economy, increases the need for transport services. Transport provides the opportunity for digital market exchange, while market virtual interactions stimulate development of both the country's transport system (development of clusters of integrated transport services) and improvement of the global transport complex.

The organization of processes and their management during the market formation of transport and production services are in the area of coordination influences of regulators (regional, interregional, and federal authorities) on the subjects of transport and production activities, social and economic activities. The influence of regulators is aimed at involving a larger number of subjects in the socio-economic space, as well as at the effective use of available resources for gradual and systematic development of regional and interregional relationships and economic ties, ensuring achievement of the highest level of development of regions (territorial entities of the Russian Federation) and the state as a whole through the prism of increasing the growth of life activity of the country's population.

The influence of regulators is based on regulatory activities, restructuring functions, methods, and mechanisms of management, subject to compliance with the target conditions of the influencing factors.

The development of clusters is a multi-stage and complex process that is formed not only from the point of view of improving production processes and improving the quality of meeting consumer demand, but also from the point of view of the socio-economic development of society, since structuring and dynamics of growth of the social environment directly depend on the level of performance of economic processes.

Currently, industrial clusters are developing most of all, including participants in the main production process, resources necessary for production, sets of sub-processes of activity, which are interconnected by common goals and objectives of improvement, construction of an integrated

technological process and unified protection from current competitive factors.

The development of industrial clusters creates the prerequisites for formation of regional clusters, in particular, clusters of integrated transport services since production of products and their delivery are closely related to consumption of types of transport services.

The cluster of integrated transport services is an economically rational direction for development of the industrial and transport segments of the economy, increasing the vitality of the country's population. The main source of development of transport clusters is integration of production and transport processes, based on which stable economic relationships are built between production entities, transport service entities and socio-economic entities.

The purpose of the dissertation research was to develop a methodology for formation of the transport and information space in the conditions of cluster development of the market for complex transport services.

During the research, methods of system analysis, the theory of active systems, control theory, the theory of self-adaptive, self-organizing and self-sustaining systems, the theory of the information society and digital economy, the theory of cluster development, the theory of the synergetic approach and assessment of integrating processes were used.

The study on constructing a methodology for formation of a transport and information space in the conditions of cluster development of the market for complex transport services makes it possible to substantiate conclusions and corrective actions, the vector of which is aimed at formation of a consolidated development strategy for the constituent entities of the Russian Federation.

As a result of the analysis of functioning of the current model of transport services in the cargo transportation market in the railway industry, it was established that guaranteed responsibility for implementation of the main quality indicators is provided only within the boundaries of responsibility of the railway complex, while coordination and mutual influence on the quality criteria of transport services in other types of transport in the general transport system is not ensured, which increases the cost of finished products.

A methodology has been developed for assessing the quality of transport services in a model of integrated transport services, which tracking and evaluate the influence of each subject on ensuring the quality of services using maximum values of the quality coefficient.

A method has been developed for detailing the structure of the impact of subjects of a complex transport service cluster on improving the quality of service, which determines the degree of their responsibility for compliance with the plan for provision of transport services, which are calculated for each category of transportation.

A methodology has been developed for optimizing the transport and production processes of a complex transport service cluster, which makes it possible to determine the total best (optimal) options for the process parameters for implementation of types of transport services, which are determined and calculated on the basis of the best (optimal) options for the parameters included into the main process of subprocesses.

A comparative model of the optimal option for optimizing the transport and logistics process has been developed, which allows studying the properties of transport and production

processes for formation and implementation of complex transport services as the main product of the transport industry.

A methodology has been developed for constructing a virtual integration system that provides rational and logically dependent design of the most important architectural elements of a directed (quoted) intelligent system at the interregional and regional levels.

A conceptual model of interaction of information flows of a complex transport service cluster has been developed, which ensures the acquisition of experience and knowledge from the transport information environment from the processes being implemented and the formation of technologies for their application.

A methodology has been developed for constructing a matrix of indicators that reflects the actual and forecast volumes of complex transport services by region of the country, structures regional, interregional, export and import complex transport services, dividing them by mode of transport.

A methodology has been developed for formalizing information flows of a cluster of complex transport services, interlinking transport and technological processes (subprocesses) between cluster subjects and executors of processes (subprocesses) based on the acquired knowledge about the areas of their implementation and the resource capabilities of cluster subjects, providing conditions for effective optimization of the process of managing transport and logistics systems and a cluster of integrated transport services.

An intersectoral information and intellectual model for integrating information flows of subjects at the interregional level has been developed, accumulating, and concentrating information knowledge in a single transport and information space and representing a quota-based information and intellectual system.

A methodology has been developed for constructing an intersectoral information-intellectual model for integrating information flows of subjects of the interregional level, which ensures concentration in one perimeter of information flows emanating from integrating information systems of subjects of the intersectoral, interregional levels, federal regulators and business associations, and provides the ability, without human influence, to implement centralized accounting, analysis and control over implementation and actual state of the processes of making optimal management decisions.

A methodology has been developed for formation of a virtual system of integration of coordinated subject cooperation at the regional and interregional levels, which ensures formation of quota-based information and intellectual products aimed at determining optimal coordination and management decisions in the context of cluster development of the complex transport service market.

A methodology for assessment actions has been developed to determine the synthesis of interaction and integration of subjects of the transport and information space, on the basis of which representatives of government bodies (regulatory subjects) form complex programs that motivate the processes of integration, virtual cooperation and the processes of development of clusters of integrated transport services and development subjects of the Russian Federation.

2.9.1 – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport.

The work was performed and defended at Ural State University of Railway Transport.





NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

The list of titles in Russian is published in the first part of the issue

Список на русском языке публикуется в первой части данного выпуска

Belokurov, V. P., Belokurov, V. P., Korablev, R. A., Busarin, E. N. Making optimal decisions in the technology of transport processes: Study guide [*Prinyatie optimalnykh reshenii v tekhnologii transportnykh protsessov: Ucheb. posobie*]. Voronezh, Voronezh State Forestry University, 2023, 183 p. ISBN 978-5-7994-1057-5.

Bimberekov, P. A. The use of theoretical and empirical methods in constructing models in water transport problems: Study guide [*Ispolzovanie teoreticheskikh i empiricheskikh metodov pri postroenii modelei v zadachakh vodnogo transporta: Ucheb. posobie*]. Novosibirsk, SGUVT publ., 2023, 354 p. ISBN 978-5-8119-0874-5.

Borodin, A. F., Bilenko, G. M., Borodina, E. V., Kuznetsova, T. G. Management of operational work. Organisation of work of a marshalling station: Study guide [*Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi. Organizatsiya raboty sortirovochnoi stantsii: Ucheb. posobie*]. Ed. by Ph.D. A. F. Borodin, G. M. Bilenko. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2023, 246 p. ISBN 978-5-7473-1162-6.

Daneilkin, Yu. V. Management of development of a high-tech industrial complex: Monograph [*Upravlenie razvitiem vysokotekhnologicheskogo promyshlennogo kompleksa: Monografiya*]. Moscow, INFRA-M publ., 2023, 282 p. ISBN 978-5-16-018126-4.

Epifanov, V. V., Obshivalkin, M. Yu. Quality of transport services in the public road transport system: Monograph [*Kachestvo transportnykh uslug v sisteme obshchestvennogo avtomobilnogo transporta: Monografiya*]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2023, 270 p. ISBN 978-5-9795-2295-1.

Khachatryan, N. K. Modeling the process of organizing railway cargo transportation: Monograph [*Modelirovanie protsessa organizatsii zheleznodorozhnykh gruzoperevozok: Monografiya*]. Moscow, MAKS Press publ., 2023, 164 p. ISBN 978-5-317-07005-2.

Komarov, V. M., Akimova, V. V. People and transport: a city for life: Monograph [*Lyudi i transport: gorod dlya zhizni: Monografiya*]. Moscow, Publishing house DELO, 2023, 158 p. ISBN 978-5-85006-479-2.

Konovalova, T. V., Kotenkova, I. N., Senin, I. S., Dombrovsky, A. N. Sustainable development of the urban transport system: Monograph [*Ustoichivoe razvitiye gorodskoi transportnoi sistemy: Monografiya*]. Krasnodar, Publishing House – Yug, 2023, 230 p. ISBN 978-5-91718-731-0.

Kopytenkova, O. I., Vilk, M. F., Aliev, O. T. [et al.] Improving the labor safety of locomotive crew workers [*Povyshenie bezopasnosti truda rabotnikov lokomotivnykh brigad*]. Moscow, Author's workshop: Davgunenko A. A., 2023, 165 p. ISBN 978-5-907450-53-0.

Krasnyanskaya, O. V. Modern trends in organization of scientific and technological development in industry: Monograph [*Sovremennye tendentsii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya v promyshlennosti: Monografiya*]. Moscow, Ruscience publ., 2023, 277 p. ISBN 978-5-466-01683-3.

Kubrin, S. S., Yapparov, E. R., Ivanov, I. M. Radio communications and telecommunications: Textbook [*Radiosvyaz i telekommunikatsii: Uchebnik*]. Moscow, RUT publ., 2023, 311 p. ISBN 978-5-00166-900-5.

Kudryavtsev, E. M., Gavrilenko, A. V., Jafari Mostafa. Modeling of internal forces in metal structures of hoisting and transport machines (in the early stages of design): Study guide

[*Modelirovanie vnutrennikh usilii v metallokonstruktsiyakh podemno-transportnykh mashin (na rannikh etapakh proektirovaniya): Ucheb. posobie*]. Moscow, ACB Publishing House, 2023, 337 p. ISBN 978-5-4323-0460-5.

Lobanova, Yu. I. Essays on the reflexive psychology of styles: (using the example of driving styles): Monograph [*Ocherki refleksivnoi psikhologii stilei: (na primere stilei avtovozhdeniya): Monografiya*]. St. Petersburg, SPbGASU publ., 2023, 309 p. ISBN 978-5-9227-1300-9.

Minnikhanov, R. N., Zhankaziev, S. V., Anikin, I. V. [et al.] Intelligent transport systems: Study guide [*Intellektualnie transportnie sistemy: Ucheb. posobie*]. Kazan, Idel-Press publ., 2023, 239 p. ISBN 978-5-4494-0160-1.

Moskalenko, M. A., Druz, I. B., Moskalenko, V. M. Peculiarities of the influence of set joints on the bearing capacity of side floors of ice-going ships: Monograph [*Osobennosti vliyaniya uzlov soedineniya nabora na neshchuyu sposobnost bortovykh perekrytii sudov ledovogo plavaniya: Monografiya*]. Moscow, INFRA-M publ., 2023, 194 p. ISBN 978-5-16-017729-8.

Nosko, A. L. Effective choice and practical recommendations for improving the designs of hydraulic and mechanical brakes: Monograph [*Effektivnyi vybor i prakticheskie rekomendatsii po sovershenstvovaniyu konstruktssii tormozov GPM: Monografiya*]. Moscow, Scientific Innovation Center International Institute for Strategic Studies, 2023, 135 p. ISBN 978-5-907682-22-1.

Novikov, A. N., Eremin, S. V., Shevtsova, A. G. Ways to improve safety of public transport in the context of promising city development: Monograph [*Puti povysheniya bezopasnosti funktsionirovaniya obshchestvennogo transporta v usloviyakh perspektivnogo razvitiya goroda: Monografiya*]. Belgorod, Publishing house of Shukhov BSTU; Oryol, Publishing House of Turgenev OSU, 2023, 238 p. ISBN 978-5-361-01180-3.

Oruch, T. A., Goman, K. I. Methodological foundations of innovative and technological development of the industrial regional economic system in the conditions of import substitution: Monograph [*Metodologicheskie osnovy innovatsionno-tekhnologicheskogo razvitiya promyshlennoi regionalnoi ekonomicheskoi sistemy v usloviyakh importozameshcheniya: Monografiya*]. Kursk, Universitetskaya kniga publ., 2023, 226 p. ISBN 978-5-907710-49-8.

Petrov, A. I., Ignatyugin, V. A., Zakharov, D. A. Specific forms of transport services for the population of large cities: Study guide [*Spetsificheskie formy transportnogo obsluzhivaniya naseleniya krupnykh gorodov: Ucheb. posobie*]. Tyumen, TIU publ., 2023, 125 p. ISBN 978-5-9961-3070-2.

Rudneva, L. N., Guryeva, M. A., Koryakina, E. A. [et al.] Modern industrial economy: conditions for development: Monograph [*Sovremennaya industrialnaya ekonomika: usloviya razvitiya: Monografiya*]. Tyumen, TIU publ., 2023, 231 p. ISBN 978-5-9961-3076-4.

Serebryakov, A. S. Technical diagnostics of rolling stock. Monitoring the main insulation of traction motors [*Tekhnicheskaya diagnostika podvizhnogo sostava. Kontrol glavnoi izolyatsii tyagovykh elektrodvigatелеi*]. Moscow, Lan publ., 2023, 292 p. ISBN 9785507450282.

Shurova, N. K., Li, V. N. Ensuring the operational efficiency of the AC railway power supply system by regulating reactive power flows in conditions of growing cargo turnover: Monograph [*Obespechenie effektivnosti ekspluatatsii sistemy elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka regulirovaniem potokov reaktivnoi moshnosti v usloviyakh rosta gruzooborota: Monografiya*]. Khabarovsk, Publishing house FESTU, 2023, 117 p. ISBN 978-5-262-00953-4.

Vuchic Vukan R. Transportation for livable cities. Transl. from English by D. Popova. Moscow, Alpina PRO publ., 2023, 675 p. ISBN 978-5-206-00045-0.

Zhuravlev, N. P., Potapov, I. P., Savelyev, M. Yu. Industrial railway transport: condition and development prospects: Study guide [*Promyshlenniy zheleznodorozhniy transport: sostoyanie i perspektivy razvitiya: Ucheb. posobie*]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2023, 144 p. ISBN 978-5-907710-81-8.



Driverless trucks started the first journey along Neva M-11 highway

First cargo delivery with driverless KAMAZ trucks started on June 14, 2023, on Neva M-11 highway.

First Deputy Prime Minister of the Russian Federation Andrey Belousov gave the start. The event was attended by Vitaly Saveliev, Minister of Transport, Alexander Beglov, Governor of St. Petersburg, Rustam Minnikhanov, Head of the Republic of Tatarstan, Vyacheslav Petushenko, Chairman of the board of Avtodor state company, Sergey Kogogin, General Director of JSC KAMAZ.

The traffic of highly automated vehicles on Neva M-11 highway was launched within the framework of experimental legal regime (ELR). The ELR program was developed with the support of the Ministry of Transport and coordinated by Digital transport and logistics association.

Largest carriers PEC, Globaltruck, Gazpromneft-Snabzhenie were the first to forward their cargo with driverless trucks.

In the framework of experiment, the entire chain of driverless commercial delivery enhanced by digital infrastructure will be tested, the results are expected to allow scaling the project to other highways.

Manufacturers of driverless vehicles (JSC KAMAZ), largest carriers (Globaltruck Logistics, Magnit JSC), Avtodor state company, providing road infrastructure, contribute to the activity within the framework of ELR.

The Government has simplified the procedures for organisation of UAV flights

The Government of the Russian Federation continues to create better conditions for development of UAV aviation. Since March 1, 2024, civil UAVs will be subject to simplified procedure to organise flights. Necessary changes were made to federal rules on the use of air space and approved by the Governmental decree signed by Mikhail Mishustin, Chairman of the Government. The document was prepared by the Ministry of Transport together with Federal Air Transport Agency. According to updated rules it is allowed to launch UAV over the settlements at the altitudes not exceeding 150 m during the daylight hours. UAV should be in the range of direct visibility of the external pilot and outside restricted areas. Those areas shall be defined by the Ministry of Transport upon proposals of regional and local authorities. The operators will not need to submit flight plan to aviation authorities for the UAV with a weight not exceeding 30 kg.

The procedures to use drones for agricultural purposes become easier, the operators will also have possibility to send a flight plan with the help of a digital platform intended for activity for the use of air space of Russia and to receive information necessary for flights including the permissions of local governing bodies.



**World of Transport
and Transportation**

Vol. 21, Iss. 3, 2023

Editor-in-Chief **Boris Lyovin**

For your letters:

Russian University of Transport,
World of Transport and
Transportation Journal,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
e-mail: mirtr@mail.ru

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,

ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

Российский университет
транспорта,

Издательство «Транспорт РУТ»

Тел.: + 7(495)2740274 доб. 3004

e-mail: mirtr@mail.ru



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >