

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ  
УДК 624.139.6  
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-3>

## Технологическое регулирование и мониторинг сооружения земляного полотна в Арктике



Таисия ШЕПИТЬКО



Святослав ЛУЦКИЙ



Игорь АРТЮШЕНКО

Таисия Васильевна Шепитько<sup>1</sup>, Святослав Яковлевич Луцкий<sup>2</sup>, Игорь Александрович Артюшенко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия.

<sup>1</sup>ORCID 0000-0002-4785-1625; Scopus Author ID 57200189585; SPIN-код: 6980-7287.

<sup>2</sup>SPIN-код: 2475-5149.

<sup>3</sup>ORCID 0000-0002-7749-9626; Web of Science Researcher ID: AAT-5175-2020; Scopus Author ID: 57214076962; SPIN-код: 5178-3827.

✉ <sup>3</sup> tywka351@mail.ru.

### АННОТАЦИЯ

Изложена технология повышения несущей способности основания дорожного земляного полотна на высокотемпературных многолетнемерзлых грунтах в Арктической зоне. Целью исследования является разработка технологических режимов упрочнения слабого основания насыпей, допускающих регулирование нагрузок при строительстве объектов на многолетнемерзлых грунтах. В качестве методов исследования в статье использовались методы организации строительства в криолитозоне, метод системного анализа и системного подхода. Методика заключается в поэтапном моделировании и расчете параметров геотехнического мониторинга состояния земляного полотна для определения максимально допустимых технологических нагрузок.

Определены задачи и функции системы регулирования и мониторинга технологических операций для направленного повышения прочностных характеристик слабых оснований в строительный период. Установлены основные

факторы, влияющие на функционирование нового природно-технического комплекса в период строительства на мерзлоте, а именно изменение температурного поля, нагрузок строительных машин и физико-механических характеристик грунтов. Показана целесообразность организации комплексных оценок и взаимного контроля деформативности грунтов средствами геотехнического мониторинга и АСУ ТП машин и строительного оборудования. Технологический режим глубинного упрочнения слабого основания геотехнических объектов должен включать регулирование параметров строительных нагрузок и контроль качества процессов при виброуплотнении верхней зоны и устройстве свайного поля. Изложены особенности опытного применения комплексной технологии для обеспечения проектной несущей способности грунтов при реконструкции и строительстве участков Северного широтного хода и железной дороги Обская – Бованенково.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, регулирование, мониторинг, несущая способность, стабильность, технология.

**Благодарности:** исследование проведено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в форме субсидии на выполнение крупного научного проекта по приоритетному направлению научно-технологического развития, соглашение № 075–15–2024–559 от 24.04.2024 года.

**Для цитирования:** Шепитько Т. В., Луцкий С. Я., Артюшенко И. А. Технологическое регулирование и мониторинг сооружения земляного полотна в Арктике // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 2 (111). С. 26-33. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-3>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article translated into English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность строительства и реконструкции путей сообщения в криолитозоне соответствует Стратегии развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года<sup>1</sup> и основным направлениям социально-экономического развития Арктики. Авторы данной статьи изложили в работе [1] особенности реализации Стратегии.

Постройка геотехнических сооружений транспортной инфраструктуры, особенно земляного полотна, на вечной мерзлоте связана с риском их деформаций и потери прочности не только в эксплуатационный, но и в строительный период. Опыт технологических расчетов и подготовки материалов (регламентов, карт и проектов производства работ) для рабочей документации строительства участков линий Томмот – Якутск, Бованенково – Карская показал необходимость учитывать риски состояния не полностью завершенных основных и защитных сооружений. Уже в подготовительный период нарушается мохо-дерновой покров, изменяются стоки поверхностных вод, а в основной период при распределении и перемещении земляных масс в корне меняется литология массивов. Эта строительная специфика не в полной мере учтена в нормативах и фундаментальных трудах ученых по механике грунтов и земляному полотну [2–4]. Вместе с тем, в Техническом регламенте<sup>2</sup> указано на необходимость обеспечить прочность и безопасность зданий и сооружений на проектной, строительной и эксплуатационной стадиях. Важность управления состоянием объектов в течение всего жизненного цикла отмечена в трудах [5; 6] и доказана практикой строительства [1]. При реконструкции земляного полотна следует дополнительно учитывать существенную неоднородность производственной программы и опасность деградации полосы отвода<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972>. Доступ 15.12.2023.

<sup>2</sup> Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон № 384-ФЗ. [Электронный ресурс]: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720). Доступ 12.09.2023.

<sup>3</sup> Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях / МИИТ. – М.: Тимр, 2005. – 96 с.

Опыт технологического проектирования развития транспортных коммуникаций Якутии, Ямала и Приполярной зоны Арктики [7; 8] показал наибольшую сложность строительства путей сообщения в районах распространения высокотемпературных многолетне-мерзлых грунтов (ММГ).

*Цель* технологического исследования – разработка методов возведения земляного полотна на высокотемпературных многолетне-мерзлых грунтах, обеспечивающих безопасность и надежность конструкции за счет регулирования и мониторинга строительных нагрузок и воздействий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Методика технологического регулирования строительства

Условием безопасного строительства является его геотехнический мониторинг (ГТМ), который по нормам<sup>4,5</sup> включает контроль температурно-влажностных параметров в теле и основании незавершенного строительством сооружения.

Основные положения соответствующей методики изложены авторами в [9]. Для стабильности грунтов основания и устойчивости конструкции на всех этапах эволюции объекта необходимо применять технологический режим систематического регулирования строительных и эксплуатационных нагрузок [10], который предусмотрен комплексной технологией (КТ), запатентованной и реализованной на северных стройках [11]. Ее содержание заключается в организации геотехнических исследований текущего состояния слабых грунтов и реализации наибольших, допустимых по безопасности, вибрационных и ударных нагрузок от уплотняющих машин. Состав КТ (рис. 1) включает подготовку производства, основной период строительства и структурные блоки. Взаимодействие блоков и организацию управления производством выполняет Центр технологического регулирования (Центр ТР). Основная функция ГТМ (в этом принципиальная разница с мониторингом эксплуатируемых объектов) состоит в информационном сопровождении и корректировке параметров производства.

<sup>4</sup> СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М., 2020. – 123 с.

<sup>5</sup> СП 305.1325800.2017. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. – М.: Стандартинформ, 2017. – 61 с.





Рис. 1. Структура технологического регулирования и мониторинга строительства геотехнических объектов [разработано авторами].

Для эффективного уплотнения грунтов принято требование [4; 12] о необходимости нагрузок на пределе прочности грунтов. Допустимая технологическая нагрузка на слабые грунты должна соответствовать условию:

$$K_n(F_\sigma - F_n)t / F_{mt} \geq K_{cm}, \quad (1)$$

где  $K_n, K_{cm}$  – соответственно, проектные коэффициенты надежности и стабильности земляного полотна в  $t$ -м технологическом цикле;

$F_\sigma, F_m$  – соответственно, безопасная для слабых грунтов и технологическая нагрузки;

$F_n$  – поровое давление.

Нагрузку  $F_\sigma$  определяют в зависимости от структуры и прочностных характеристик слабого слоя по правилам<sup>4,6</sup>. В режиме виброуплотнения грунтов следует учитывать безопасный предел:

$$F_{mt}(P_k A_r V_r v_r) < \min[F_{np}, F_\sigma, F_{mc}]t, \quad (2)$$

где  $F_{mt}$  – нагрузка, зависящая от контактной жесткости слоя грунта и параметров вибровальца – веса  $P_k$ , амплитуды  $A$ , скорости движения  $V$ , частоты  $v$ ;

$F_{np}$  – предел прочности грунтов;

$F_{mc}$  – тиксотропный предел нагрузки в  $t$ -й период производства работ (рабочую смену).

В этих условиях следует рассчитывать

риск нарушения стабильности основания строительными машинами, при котором технологическое воздействие превышает безопасную для грунтов нагрузку (с учетом порового давления) [13]. Предельное состояние определяется вероятностью  $P_t$  того, что величина  $F_\sigma$  будет меньше технологической нагрузки от машин  $F_m$  и построенной части объекта  $F_c$ :

$$P_t = p[F_\sigma - (F_m + F_c) / K_n]t < 0. \quad (3)$$

Таким образом, в ходе строительных работ Центр ТР выполняет непрерывную диагностику возводимого земляного полотна для профилактики его предельного состояния, особенно на участках индивидуального проектирования (косогорах, карстах и др.)

Подготовительный период КТ включает стадии устройства дренажной системы, рабочей платформы для тяжелой строительной техники и организации геотехнического мониторинга. Дренажные прорезы обеспечивают снижение влажности за счет отжатия воды виброкатком из деятельного слоя осенью в начале промерзания и миграционного влагонакопления [14]. Устройство рабочей платформы – путей для перемещения тяжелой строительной техники выполняют в интенсивном режиме уплотнения. На этой стадии

<sup>6</sup> СП 447.1325800.2019. Железные дороги в районах вечной мерзлоты. - М.: Стандартинформ, 2019. – 40 с.

формируются требования к ГТМ по определению температурно-влажностных характеристик грунтов, контролю объема миграции воды, суммарной влажности и стабильности деятельного слоя.

Для регистрации текущих изменений теплообмена в массивах возводимого объекта и природной среды по нормам<sup>5, 6</sup> следует выполнить работы по устройству стационарных пунктов мониторинга и сетей контроля температурного режима и деформаций каждого слоя. Регулярные опросы сетей особенно важны для оценки работы дренажной системы и стабилизации грунтов оснований.

В ходе подготовки производства Центр ТР должен иметь постоянную информацию о состоянии инженерных сооружений. Если стабильность по нормам<sup>4</sup> не обеспечена, следует применить организационно-технологические решения:

1) интенсивную технологию виброуплотнения основания в комплексе с дренажной системой прорезей и водоотводов;

2) замену слабого грунта песком, посадку песчаного массива на минеральное дно;

3) устройство свайного поля.

Выбор варианта упрочнения включает моделирование, расчет технологических параметров, прогноз осадок, прочностных характеристик грунтов, сроков и стоимости производства работ. При определении осадок в строительный период нужно учитывать анизотропность, структуру грунтовых напластований, реологические свойства грунтов, возможность их ухудшения при нестабилизированном состоянии в ходе работ и календарный график производства. Деформативность основания земляных сооружений прогнозируют с учетом принципа динамического равновесия между количеством незамерзшей воды и льдистости при изменении температуры и давления [4; 6].

### Практическая реализация

Анализ результатов исследования и опытной проверки КТ и ГТМ содержится в работе авторов [1], в которой отмечено, что «разработана комплексная технология сооружения земляного полотна на высокотемпературных ММГ, основанная на регулировании строительных нагрузок и мониторинге механических и теплофизических процессов в режиме реального времени».

Взаимосвязь блоков технологического

регулирования и ГТМ в наибольшей степени проявляется в основной период упрочнения слабых оснований. При удалении слабых грунтов с заменой песчаным массивом выполняются уплотнение грунтов виброкатками, ударно-импульсной или буровзрывной технологией. По требованиям<sup>4</sup> основные строительные работы должны сопровождаться мониторингом и регулированием технологической нагрузки с учетом прогноза состояния каждого слоя в процессе производства работ [10].

Для выполнения этой сложной задачи на многокилометровом участке трассы с переменными грунтовыми условиями работы мехколонны используют весь предусмотренный нормами<sup>5</sup> арсенал ГТМ (геодезический, параметрический мониторинг, геофизические исследования) и возможности контрольно-оповестительной системы [5; 15]. Характеристики грунтов основания проверяют контрольным бурением по глубине замененного массива грунта с определением наличия линз – остатков слабых переувлажненных грунтов и торфов. Именно на этих участках повышенная влажность приводит к снижению прочностных характеристик модуля деформации (рис. 2) и, как следствие, к риску ползучести и выдавливания грунтов из подоткосной части насыпи. Это явление подтверждает регрессионная зависимость, полученная по результатам статистического анализа данных изысканий на опытном участке проектирования линии Обская – Салехард [8]:

$$E = 6,46 + 690,19X + 0,07Y^2 - 1,06Y - 20,66XY - 1738,54X^2, \quad (4)$$

где  $X$  – сцепление  $C$ , МПа;

$Y$  – угол внутреннего трения  $\varphi$ , град;

$E$  – модуль деформации, МПа.

Данная зависимость ( $R = 0,86$ ;  $F = 27,9$ ;  $p = 0$ ;  $N = 48$ ) показывает взаимодействие деформационных и прочностных характеристик слабых грунтов. Применение технологии устройства дренажной системы и режима виброуплотнения для подготовки рабочей платформы увеличивает значения характеристика  $C$  и  $\varphi$ , соответственно, повышается модуль  $E$ .

Технологический режим должен учитывать динамику порового давления в недренированном (неконсолидированном) состоянии грунтового массива на основе численного моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния грунтового мас-



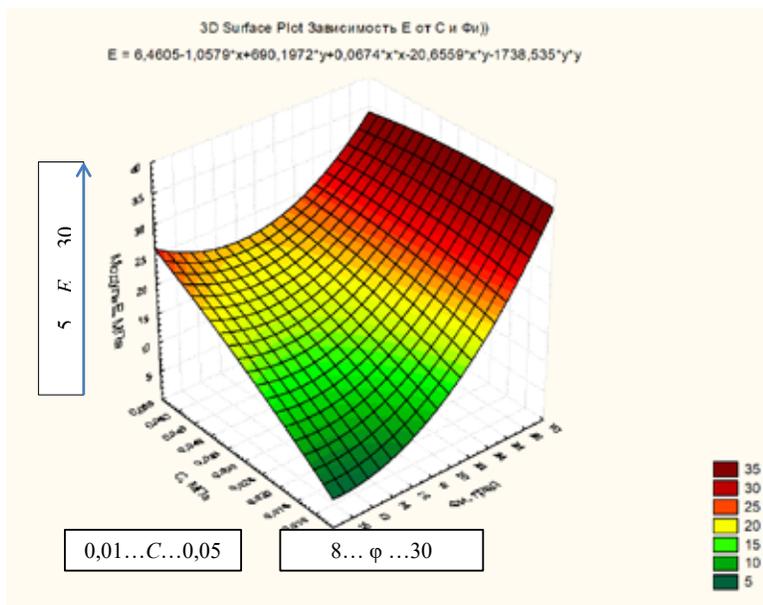


Рис. 2. Взаимосвязь изменения модуля деформации  $E$ , МПа, сцепления  $C$ , МПа и угла внутреннего трения  $\varphi$ , град. талых связных грунтов [разработано авторами].

сива. Если осадка ускорилась, строительную нагрузку следует откорректировать, уплотнение прекратить, провести дополнительно инженерно-гидрологические изыскания.

Опытное применение КТ на основаниях с глубоким (больше активной зоны) размещением просадочных грунтов по варианту их вырезки с заменой песком показало необходимость индивидуальных решений, приведенных в [13]. Для эффективного виброуплотнения песка предложено регулировать режим работ виброкатка. При уплотнении песчаного массива ударно-импульсным способом [13] определены регулируемые параметры: размещение позиций машины УИМ, импульс удара, число ударов на каждой позиции. Особенность регулирования заключается в систематическом диагнозе основания на каждой позиции и между позициями машины и расчете параметров ударного (динамического) воздействия в зависимости от состояния массива песка. Опыт строительства автомагистрали на слабых грунтах [11; 13] показал эффективность сопровождения работ комплексными геофизическими исследованиями, включающими: электроразведку; сейсморазведку; мобильное георадиолокационное профилирование; гидрогеологические обследования с режимными скважинами. Комплексный ГТМ позволяет контролировать замену слабых заторфованных грунтов, поровое давление и плотность

песчаного массива.

Наиболее сложные условия реализации КТ были установлены при разработке СТУ завершения строительства (усиления) железнодорожной линии Надым – Пангоды [17]. По материалам инженерных изысканий на трассе распространены островная вечная мерзлота, переувлажненные мелкие пылеватые пески и суглинки текучепластичной консистенции, которые относятся к слабым пучинистым грунтам с низкой несущей способностью. Для реконструкции земляного полотна запроектированы принципиально разные поперечные профили: а) пристройка с уступами к насыпи действующего пути; б) надстройка насыпей над действующим путем; в) новые сооружения. Наибольшие деформации происходят под технологическими нагрузками при производстве работ в подоткосной части существующих дорожных насыпей с увеличением оттаивающего слоя пластично-мерзлых грунтов. Возрастают риски опасного сочетания нагрузок и предельного состояния незавершенного объекта, которые связаны с переменными условиями многокилометрового фронта работ, разными конструкциями сооружений, неоднородностью состава грунтов по продольным и поперечным профилям насыпей и выемок. В этих условиях следует рассчитывать риск нарушения стабильности основания строительными машинами, при котором технологическое

воздействие превышает безопасную для грунтов нагрузку.

Расчетные параметры должны определяться с учетом переменных по трассе и в ходе работ условий производства – неоднородности характеристик геологии, литологии, уклонов местности. Оценку изменений состояния полосы отвода при сооружении земляного полотна выполняют стационарные пункты мониторинга и Центр ТР с использованием данных цифровой аэросъемки и наземного лазерного сканирования.

Для повышения оперативности ГТМ в [1] приведены рекомендации о целесообразности организовать постоянную передачу цифровой информации о состоянии грунтов в каждом слое основания по результатам геофизических исследований в Центр ТР, блок автоматизированных устройств регулирования режимов строительной техники. Интенсивные нагрузки машин способны привести к активизации опасных природных явлений. Например, оползневый и карстово-суффозионный процессы чувствительны к изменению (перемещению) состояния грунтовых массивов. К потере устойчивости насыпей могут привести перемещение земляных масс на профиле дороги, перераспределение грунтовых и поверхностных вод, переменные нагрузки землеройно-транспортных комплексов.

Учет такого взаимодействия соответствует современным тенденциям совершенствования механизации работ с применением системы дистанционного программного или автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП) [18]. Системы лазерного сканирования учитывают отметки продольного и поперечного профиля сооружения, которые изменяются при работе машин в любой точке строительной площадки. Операционная задача заключается в организации взаимодействия геотехнического мониторинга и АСУ машин для направленного и безопасного повышения несущей способности оснований<sup>7</sup>.

Рост вибронагрузки катка в деятельном слое приводит к увеличению влажности и, как следствие, к снижению модуля дефор-

мации грунтов. Операционный контроль должен предусматривать синхронную оценку соответствия текущих значений безопасной нагрузки и регулируемых режимов – изменения амплитуды и частоты колебаний вибровальца. Данные геотехнического мониторинга являются исходными для современных виброкатков [19]. Бортовой компьютер машины позволяет устанавливать параметры вибрации и скорость движения катка в зависимости от степени уплотнения грунта. После регистрации и преобразования сигналов о выполнении условия (1) появляется возможность повысить или же при опасном сигнале – немедленно снизить вибронагрузку до максимально допустимой величины и перейти на осцилляцию. Например, АСУ Variocontrol катка Bomag обеспечивает бесступенчатое повышение амплитуды и настройку частоты для изменения возмущающей силы до максимального значения. Одновременно бортовой ПК определяет динамический модуль деформации грунта через соотношение контактной зоны, динамического давления вальца и предела прочности грунта на сжатие. Текущее значение машинного модуля деформации следует сравнить с расчетными деформационными характеристиками уплотняемого слоя, полученными от ГТМ и грунтовых лабораторий. Эти данные передаются в Центр ТР для диагностики и прогноза состояния объекта. Систематическое регулирование вибронагрузки и контроль плотности грунтов позволяют повысить прочность и выполнить проектные требования к основанию на конкретном участке возведения насыпи.

На участках глубинного упрочнения слабого основания следует организовать контроль качества процессов виброуплотнения верхней зоны для рабочей платформы и устройства свайного поля в виде буронабивных, геотекстильных или щебеночных свай-столбов (в зависимости от проектного решения) с гибким ростверком. Для этой цели применяют моделирование и расчет несущей способности свай в ПК Midas GTS NX [15; 17].

При устройстве свай по данным инженерных изысканий учитывают геологическую структуру, уровень грунтовых вод и характеристики грунтов. Современные вибропогружатели и буровые машины (например, фирмы Liebherr) обеспечивают качество работ с по-

<sup>7</sup> Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972>. Доступ 15.12.2023.



мощью бортовой АСУ ТП для контроля и регулирования скорости бурения, глубины и вертикальности погружения шнека в грунт, давления бетонной смеси. Программный комплекс машины позволяет получить паспорт сваи с ее профилем на геологическом разрезе и объемом материала, уложенного в скважину. В ходе свайных работ контрольные функции ГТМ направлены на уточнение информации о расчетных значениях сопротивления грунтов по боковой поверхности свай. Испытания свай и межсвайной зоны следует включить в комплекс работ по завершению технологического цикла подготовки основания.

Устройство свай методами виброугружения и забивки позволяет повысить плотность основания

$$\rho_{dt} = \frac{\rho_{do}}{1 - \frac{K_y V_{dt}}{V}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{do}$  – начальная плотность грунтов;

$V$  – объем массива;

$K_y$  – коэффициент уплотнения;

$V_{dt}$  – дополнительный объем материалов упрочнения основания в ходе технологического регулирования (объем песка при уплотнении дренирующего слоя и объем буронабивных свай).

После свайных работ и устройства гибкого ростверка выполняется завершающая стадия КТ – виброуплотнение ростверка и контроль проектной надежности основания для перехода к конструктивно-технологическому циклу возведения насыпи. При организации строительного контроля следует учесть возможность взаимодействия ГТМ и современной контрольно-оповестительной системы (КОС). Разработанная для эксплуатации сооружений в сложных гидрогеологических условиях КОС может быть полезна уже на строительной стадии с целью своевременной регистрации предпредельного состояния, особенно оползневых участков. В структурной схеме (см. рис. 1) предусмотрена взаимосвязь блоков с аппаратной и линейной подсистемами КОС, включающей волоконно-оптические кабели для измерения и контроля температуры и деформаций линейно-распределенными сенсорами [19]. Возможность получения постоянной информации об этих характеристиках позволит контролировать изменение температурного поля и напряжений в грунтах в ходе строительства.

## Опыт применения

Практическое приложение результатов многолетних исследований изложено авторами в [1]. В частности отмечено, что «основные положения КТ и геотехнического мониторинга были разработаны и усовершенствованы ИПСС РУТ (МИИТ) в 2009–2019 гг. На их основе разработаны технологические регламенты постройки участков железных дорог Обская – Бованенково – Карская и Беркабит – Томмот – Якутск и строительства автодороги Надым – Салехард [16]. Исследования выполнены в рамках «Соглашения о стратегическом партнерстве между Правительством Ямало-Ненецкого автономного округа и Российским университетом транспорта», подписанного в 2013 году и актуализированного в 2018 г.» [1].

В технологическом регламенте постройки участков линии Обская – Бованенково – Карская мониторинг включал анализ геокриологических процессов для постройки технологической автодороги, одноэтапного и двухэтапного возведения насыпей из притрассовых карьеров. Прогноз формирования теплового поля под проектной насыпью участка СШХ, выполненный по программе «Qfrost» [11] с учетом теплопроводности и годового баланса температур, установил образование новых и развитие существующих несквозных таликовых зон.

Результаты исследований авторов по упрочнению высокотемпературных ММГ проверены в условиях реконструкции железных дорог. Подготовленные предложения по переустройству земляного полотна включены в СТУ – специальные технические условия на проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию объекта «Завершение строительства (усиление) железнодорожной линии «Надым – Пангоды», они доложены на конференции, организованной ЯНАО [20].

## Выводы

Возведение земляного полотна на высокотемпературных ММГ с применением мощной строительной техники связано с риском предельных состояний основания и потери устойчивости незавершенных геотехнических конструкций. Предложенная КТ включает устройство дренажа, регулируемые технологические режимы и мониторинг, которые совместно и направлены обеспечивают проектные требования по безопасности объекта.

Геотехнический мониторинг на стадии строительного производства и регулирования строительных нагрузок включает взаимодополняющие исследования механических и теплофизических процессов, проходящих в слоях оттаивающих и талых грунтов в ходе строительно-монтажных работ. Для оценки влияния производства работ на состояние грунтов перспективна взаимосвязь функций мониторинга с АСУ ТП строительных машин.

Для эффективной реализации разработанной технологической системы регулирования и мониторинга процессов упрочнения слабых грунтов целесообразно предусмотреть в сводном календарном плане строительства участка железнодорожного пути организацию опытных участков земляного полотна с полевыми испытаниями и геокриологическими исследованиями динамики несущей способности основания под воздействием строительной техники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шепитько Т. В., Луцкий С. Я., Артюшенко И. А. Технологическое регулирование и мониторинг сооружения земляного полотна в криолитозоне // TRANSOILCOLD 2023: Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года / под общей редакцией Т. В. Шепитько. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2023. – С. 185–188. EDN: RCIZKN.
2. Брушков А. В., Харрис С. А., Чэн Г. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. Том 1. – М.: Директ-Медиа, 2020. – 437 с. ISBN 978-5-4499-1199-5.
3. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
4. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Libroком, 2009. – 445 с. ISBN 978-5-397-00966-9.
5. Ашпиз Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог. – М.: Путь-Пресс, 2002. – 112 с. ISBN 5-88332436-3/7.
6. Li, Guoyu; Li, Ning; Quan, Xiaojuan. The temperature features for different ventilated-duct embankments with adjustable shutters in the Qinghai–Tibet railway. Cold Regions Science and Technology, 2006, Iss. 44, pp. 99–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2005.08.002.

7. Jiankun, Liu; Liyun, Peng. Experimental Study on the Unconfined Compression of a Thawing Soil. Cold Regions Science and Technology, 2009, Vol. 58, pp. 92–96. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.03.008.

8. Lutskiy, S. Ya., Shepitko, T. V., Cherkasov, A. M. Composite technology of earthwork construction on taliks in cryolithic zones. Cold Regions Science and Technology, 2013, Vol. 5, pp. 577–581. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2013.00577.

9. Луцкий С. Я., Шепитько Т. В., Токарев П. М., Дудников А. Н. Строительство путей сообщения на севере: Научно-практическое издание. – М.: ЛАТМЕС, 2009. – 286 с. ISBN 978-5-93271-529-1.

10. Луцкий С. Я., Ашпиз Е. С., Долгов Д. В. Дорожное полотно и способ его возведения // Патент № 2005104907/09(006247). – М.: ФИПС. – 2005. [Электронный ресурс]: <https://patents.google.com/patent/RU2273687C1/ru>. Доступ 17.12.2023.

11. Луцкий С. Я., Роман Л. Т. Технологическое регулирование характеристик многолетнемерзлых грунтов в основании дорог // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 3. – С. 26–30. EDN: ZSSKCL.

12. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1975. – 285 с.

13. Луцкий С. Я., Сакун Б. В. Теория и практика транспортного строительства. – М.: Первая образцовая типография, 2018. – 304 с. ISBN 978-5-98585-219-6.

14. Shepitko, T. V., Lutskiy, S. Ya., Landsman, A. Ya., Artyushenko, I. A. Features of the Construction of the Roadbed in the Areas of High-Temperature Permafrost of the Northern Latitudinal Passage. AIP Conf. Proceedings, 2023, Vol. 2476, Iss. 1, art. 020025. DOI: 10.1063/5.0103111.

15. Лычковский А. А., Луцкий С. Я. Особенности геотехнического мониторинга сооружения земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах // Вестник СГУПС. – 2022. – № 3 (62). – С. 23–30. DOI: 10.52170/1815-9265\_2022\_62\_23.

16. Shepitko, T. V., Lutskiy, S. Y., Nak, G. I., Cherkasov, A. M. Technological Features of Construction and Reconstruction of Geotechnical Structures in the Arctic Zone. Designs, 2022, Vol. 6, Iss. 2, 34. DOI: 10.3390/designs6020034.

17. Луцкий С. Я., Артюшенко И. А. Методы и модели организации строительства железных дорог. – М.: Изд-во «Перо», 2022. – 147 с. ISBN 978-5-00204-783-3.

18. Floss, R. Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau. Deutschland, Koblenz: BOMAG GmbH & Co. OHG, 2001. – 148 p. ISBN 978-3433007068.

19. Дмитриев С. А. Инновационные волоконные технологии для железнодорожного транспорта // Транспорт Российской Федерации. – № 1–2016. – С. 26–27. EDN: VXESQH

20. Шепитько Т. В., Нак Г. И., Черкасов А. М., Луцкий С. Я. Технологические особенности строительства и реконструкции геотехнических сооружений в криолитозоне // В сб.: Современные исследования трансформации криосферы в Арктике. Салехард, 2021. – С. 484–486. DOI: 10.7868/9785604610848130. ●

### Информация об авторах:

**Шепитько Таисия Васильевна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и строительства железных дорог Российского университета транспорта, директор Института пути, строительства и сооружений, Москва, Россия, [shepitko-tv@mail.ru](mailto:shepitko-tv@mail.ru).

**Луцкий Святослав Яковлевич** – доктор технических наук, профессор, Москва, Россия, [lsy40@mail.ru](mailto:lsy40@mail.ru).

**Артюшенко Игорь Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства железных дорог Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия, [tyuka351@mail.ru](mailto:tyuka351@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 14.05.2024, одобрена после рецензирования 27.05.2024, принята к публикации 30.05.2024.

