

Разработка алгоритма анализа состояния дорожного полотна с применением искусственного интеллекта



Артём РАДА



Николай КОНЬКОВ

Артём Олегович Рада¹,
Николай Юрьевич Коньков²

^{1, 2} Институт цифры Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-7678-8402; Scopus Author ID: 57201063141; РИНЦ Author ID: 1044755.

✉ ¹ rada.ao@kemsu.ru.

АННОТАЦИЯ

Автомобильные дороги являются стратегически необходимой частью инфраструктуры страны, высокие требования к их состоянию обуславливают регулярный контроль качества дорожного полотна. Большая протяженность автомобильных дорог в России и влияние на них погодноклиматических условий (сезонные колебания температур, осадки) подчеркивают актуальность поиска методов неразрушающего контроля при диагностике дорог, обеспечивающих короткие сроки выполнения диагностических работ и использование минимальных ресурсов.

Рассмотрены существующие решения для обнаружения повреждений дорожного полотна: применение георадара, лазерного метода, метода анализа вибровоздействий неровностей дорожной поверхности, детекция повреждений по данным лидар-устройств и системы мобильного картографирования.

Целью исследования является разработка алгоритма анализа состояния дорожного полотна, позволяющего осуществлять детекцию дефектов дорожного покрытия по снимкам, полученным в процессе диагностики автомобильных дорог аэродромно-дорожной измерительной передвижной лабораторией КП-514-RDT, в комплексе с программным обеспечением IndorRoad и RDT-Line.

Разработка алгоритма для обнаружения дефектов покрытия автодороги осуществлялась с применением методов машинного обучения. Выявленные дефекты имеют точную геопривязку по пикетажу измеряемого участка автодороги. В результате разработки получена обученная модель, позволяющая в автоматическом режиме размечать на снимке дефекты разных классов. Разработанный алгоритм интегрирован в программное обеспечение для управления мониторингом состояния региональных и муниципальных дорог.

Ключевые слова: автомобильные дороги, диагностика автомобильных дорог, неразрушающий контроль, искусственный интеллект, машинное обучение, детекция дефектов дорожного покрытия.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий от 30 сентября 2022 г № 075–15–2022–1195.

Для цитирования: Рада А. О., Коньков Н. Ю. Разработка алгоритма анализа состояния дорожного полотна с применением искусственного интеллекта // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 2 (111). С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-5>.

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

ВВЕДЕНИЕ

Состояние дорожного полотна напрямую влияет на степень безопасности дорожного движения [1; 2]. Согласно статистике Научного центра безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации, по состоянию на конец 2022 года неудовлетворительные дорожные условия, подразумевающие ненадлежащее состояние и обустройство автомобильных дорог и железнодорожных переездов, являлись причиной 30,5 % произошедших дорожно-транспортных происшествий. Число погибших в таких ДТП составило 4089 человек, а раненных – 48 241 [3]. В этой связи важной государственной задачей является обеспечение мер по поддержанию дорог в нормативном состоянии.

По данным Росстата, в настоящее время протяженность сети автомобильных дорог общего пользования в России составляет 1 575,5 тыс. км, из которых 64,7 тыс. км – дороги федерального значения, 503 тыс. км – дороги регионального значения или межмуниципального значения, 1 008 тыс. км – дороги местного значения. Твердое покрытие отсутствует на 29,2 % автодорог, усовершенствованную дорожную одежду проезжей части, обеспечивающую высокую пропускную способность независимо от природно-климатических условий, имеют меньше половины из них¹. При этом 15,3 % федеральных дорог², 49,4 % региональных дорог и 46,3 % дорог местного значения не отвечают нормативным требованиям¹, что может стать причиной дорожно-транспортных происшествий. Следовательно, своевременное выявление и диагностика повреждений дорожного полотна имеют решающее значение для целей обеспечения безопасности дорожного движения [4; 5].

Согласно требованиям законодательства³, ежегодная диагностика, обследование и оценка технического состояния автомобильных

дорог в целях определения соответствия транспортно-эксплуатационных характеристик требованиям технических регламентов является обязанностью владельца автомобильных дорог. Качественный мониторинг автодороги позволяет проанализировать и спрогнозировать срок службы объекта дорожного хозяйства, грамотно спланировать будущие работы по приведению объектов к соответствию нормативным требованиям, распределить финансовые ресурсы и контролировать работу генерального подрядчика, что благоприятно скажется на улучшении дорожной безопасности и снижении смертности от ДТП по причине неудовлетворительных дорожных условий.

Протяженность автомобильных дорог в России подразумевает большой объем работ по диагностике, это оказывает воздействие на сроки и стоимость их проведения, что особенно важно учитывать ввиду ограниченности ресурсов местных и региональных бюджетов [6]. Здесь актуальным становится создание более эффективных и оперативных методов оценки качества дорожного полотна.

Традиционные методы оценки качества автодорог [7] занимают длительное время, требуют большого количества оборудования и специалистов, что не позволяет говорить об их оперативности и эффективности. Особую значимость при проведении диагностики дорожных конструкций в этой связи приобретают мобильные методы неразрушающего контроля, в таком случае при выполнении исследования объект не теряет своих исходных свойств, а работы возможно выполнить в короткие сроки, не используя при этом большой объем ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью формирования требований к разработке алгоритма анализа состояния дорожного полотна проведен обзор существующих решений мобильного неразрушающего контроля при диагностике автомобильных дорог.

В статье [8] подробно описан один из методов неразрушающего контроля – диагностика автомобильных дорог с применением георадара. Георадиолокационный метод целесообразно применять в целях выявления различных признаков деформации дорожного покрытия, которые не определяются методом бурения в дорожной одежде. Георадиолокационное исследование основано на

¹ Транспорт. Официальная статистика: Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>. Доступ 10.09.2023.

² Протяженность федеральных дорог. [Электронный ресурс]: <https://map.rosavtdor.gov.ru/>. Доступ 10.09.2023.

³ Федеральный закон от 08.11.2007 № 257-ФЗ «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/26452>. Доступ 10.09.2023.



изучении поля высокочастотных волн, а также различии горных пород по диэлектрической проницаемости. В случае, описанном в указанной работе, георадар ОКО-2 с воздушной экранированной антенной АБ-1000Р был прикреплен с помощью кронштейна к автомобилю, осуществляющему непрерывное движение. Исследования проводились на примере действующего объекта, по результатам анализа совокупности отраженных сигналов в специальном программном обеспечении выявлены трещины, разрушения, ямы, присутствующие в верхнем слое дорожной одежды, требующие проведения замены асфальтобетонного покрытия. Данный метод эффективен в решении задач обнаружения и выявления дефектов дорожного полотна, но в то же время интерпретация результатов работы георадара представляет сложный и трудоемкий процесс, доступный только специалистам, имеющим профессиональные навыки в области геологических исследований. Кроме того, метод имеет свои ограничения: качество полученных исследований может снизиться при плохих погодных условиях (дождь, температура воздуха ниже -40 и выше $+40$ градусов)⁴.

Для получения точной геометрии и визуального описания дорожных дефектов целесообразно использовать высокодетализированные пространственные данные. Одним из способов получения таких данных является проведение лазерного сканирования автомобильной дороги. Лазерное сканирование производится с помощью камер, лазерного оборудования (лидар) и навигационных устройств, установленных на транспортном средстве [9]. Результатом лазерного сканирования будет являться облако точек, представляющее цифровую трехмерную модель дороги. С помощью трехмерной модели возможно определять дефекты дорожной поверхности и проводить необходимые измерения. Из-за дороговизны лазерного оборудования данный метод не может быть широко применен для диагностики региональных и местных дорог, кроме того работа лидара ограничена в некоторых погодных условиях.

В работе [10] входные данные для обнаружения дорожных дефектов включают об-

лака точек и ортомозаику, собранные с помощью технологии мобильного картографирования, подразумевающего использование сканирующей системы Trimble MX9, установленной на крыше транспортного средства. Способ включал несколько этапов: сбор данных посредством мобильного картографирования, обработка полученных результатов, классификация пространственных объектов для дальнейшего определения местоположения конкретного дефекта (проезжая часть, велослужба, пешеходная зона), визуальный осмотр оператором ортомозаики и панорамных снимков и извлечение из них области повреждений дороги в виде полигонов, линий или точек. Каждому выделенному изображению присваивались уникальный идентификатор и атрибуты, включающие поверхность дефекта, местоположение дефекта, номер полосы расположения, глубину, тип, уровень серьезности, размер и другие геометрические параметры. По результатам выполнения работ получена база данных повреждений автомобильной дороги, состоящая из шейп-файлов с точечными, линейными и полигональными дефектами.

Метод мобильного картографирования в диагностике дорог имеет ряд преимуществ: высокая скорость сканирования, позволяющая не останавливать движение на объекте исследования, сокращение времени и финансовых затрат на проведение полевых работ, большой объем атрибутивных данных по каждому повреждению, точное определение местоположения найденного дефекта, возможность сортировки базы данных повреждений. При этом использование данного метода предполагает работу обученного оператора, способного по изображению осуществить не только поиск, но и классификацию дефектов дорожного полотна. Автоматизация поиска повреждений в данном случае требует использования специализированного программного обеспечения.

Задачу детекции дефектов дорожного покрытия по данным лазерного сканирования без необходимости разметки данных с участием оператора исследует автор статьи⁵. Целью проекта являлась разработка алгоритма автоматического обнаружения дефек-

⁴ Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. [Электронный ресурс]: <https://pandia.ru/text/77/122/621.php>. Доступ 23.09.2023.

⁵ Детекция дефектов дорожного покрытия без размеченных данных: Хакатон, Lidar, Ransac, ICP и 44 бессонных часов. [Электронный ресурс]: <https://habr.com/ru/articles/765230/>. Доступ 25.02.2024.

тов дорожного покрытия на данных, полученных с лидар-устройства. Сложность такого подхода заключается в большом объеме подготовительных процессов, включающих подготовку качественного облака точек и выделения области поиска дефектов. Так, на первом этапе произведена конвертация формата данных *db* с вложенным бинарным кодом в удобный для работы формат *csv*. Затем с помощью алгоритма RANSAC произведена коррекция данных. В целях создания качественного датасета полученные облака точек выровнены с помощью алгоритма RANSAC. Для минимизации потенциальных ошибок и искажения с использованием ICP алгоритма два облака точек объединены в одно. Это позволило преобразовать облако точек в качественный материал для дальнейшего поиска повреждений дорожного полотна. Детекция дефектов, в частности глубоких ям, производилась в выделенной зоне с наивысшей плотностью точек. Сам разработанный алгоритм поиска ям заключался в определении статистических выбросов в распределении высоты точек с применением метода кластеризации DBSCAN, позволяющему группировать точки, определяемые как «яма», в отдельные кластеры. По результатам всех проведенных работ определены координаты центра каждого кластера, представляющие собой точное местоположение дефекта дороги. Таким образом, в работе удалось добиться результата детекции одного из видов повреждений – ямы.

В патенте на изобретение «Способ диагностики ровности поверхности дорожного покрытия» [11] представлен способ оценки качества дорожного покрытия путем анализа вибровоздействий неровностей дороги при движении автомобиля. Данный способ предполагает использование мобильного виброизмерительного комплекса, состоящего из вибродатчиков, установленных на неподдресоренной части автомобиля, вычислительного комплекса, рабочего места оператора, средств электропитания и спутниковой системы позиционирования. Оценка качества дорожного полотна в данном случае производится за счет сравнения амплитуд вибровоздействия полученной эталонной базы параметров ровности дороги на этапе паспортизации при вводе дороги в эксплуатацию и данных контрольного измерения в период эксплуатации автодороги на одноименных

точках трассы. На основе результатов анализа изменения параметров вибровоздействий возможно выявить участки разрушения покрытия, сформировать рекомендации по корректировке скоростного режима на исследуемых участках автодороги и, по заявлению авторов, спрогнозировать сроки эксплуатации дорожного покрытия. Необходимость эталонной базы параметров ровности автодороги затрудняет использование данного метода при больших объемах работ, так как требует увеличения затрат на проведение паспортизации.

Рассмотренные решения неразрушающего контроля эффективны в диагностике состояния автомобильных дорог, но в полной мере не обеспечивают автоматизацию поиска повреждений дорожной поверхности, удобного для использования принимающими решения лицам. На сегодняшний день набирают популярность и имеют доказанную эффективность инструменты автоматизации и повышения оперативности получения данных о состоянии дорожного полотна, разработанные с использованием искусственного интеллекта.

Диагностика автомобильных дорог с использованием искусственного интеллекта в последнее десятилетие широко изучается за рубежом [12–17]. В России данная тема представлена работами С. С. Кравцова, И. А. Канаевой, Б. В. Соболев, П. В. Васильева и другими [18–23]. В основе решений – метод автоматической обработки изображений, полученных с помощью смартфона, видеорежистратора, установленного в автомобиле, или БПЛА. В данной работе продемонстрирован процесс разработки алгоритма анализа состояния дорожного полотна, позволяющего осуществить детекцию дефектов дорожного покрытия по снимкам аэродромно-дорожной лаборатории.

На основе результатов обзора существующих решений мобильного неразрушающего контроля при диагностике автомобильных дорог сформированы отличительные характеристики алгоритма анализа состояния дорожного полотна, разрабатываемого в рамках проведения данной научной работы:

– сбор данных для оценки состояния дорожного покрытия при движении на скорости (без дорогостоящего перекрытия движения транспорта по автодорогам и без рисков, связанных с проводимыми работами вдоль оживленных магистралей с плотным движением);



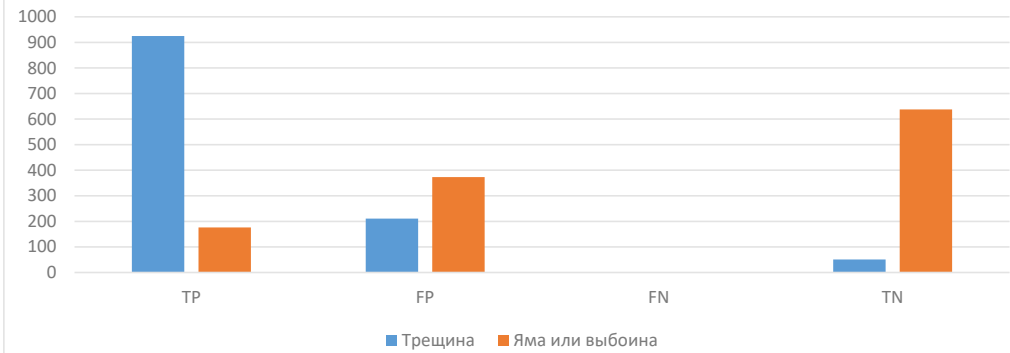


Рис. 1. Метрика «Матрица ошибок» [выполнена авторами].

- применение машинного зрения для обнаружения повреждений дорожного полотна;
- отсутствие необходимости проводить первичную (эталонную) съемку состояния дорожного полотна автомобильной дороги;
- точная геопривязка выявленного дефекта по пикетажу измеряемого участка дороги.

При разработке алгоритма применялись данные, полученные в рамках проведения работ по паспортизации автомобильных дорог с использованием комплекса измерительной аэродромно-дорожной лаборатории КП-514-RDT в комплекте с программным обеспечением IndorRoad и RDT-Line. Полученные в ходе исследования кадры с помощью программного обеспечения были сформированы в отдельный поток фотографий небольших по протяженности участков дорожного полотна одного размера, условно соединяющихся в единый кадр всего диагностируемого пути. На втором этапе была определена оптимальная архитектура нейронной сети для решения задачи нахождения и сегментации дефектов дорожного покрытия; на третьем – проведена подготовка своего обучающего датасета: в ручном режиме на 2500 снимках были определены 35225 дефектов. Для разметки использовались такие типы объектов, как трещина, яма

или выбоина, сетка трещин, волны, просадки и вспучивание, заделанные выбоины и другие дефекты.

В результате машинного обучения используемой архитектуры нейронной сети Mask R-CNN была получена модель, позволяющая в автоматическом режиме размечать на снимке дефекты разных классов. Качество модели оценивалось по датасету, включающему 1000 фотографий с дефектами двух классов: «Трещины» и «Ямы/выбоины».

В целях оценки производительности модели приведена метрика «Матрица ошибок» (рис. 1). Метрика представляет собой таблицу с четырьмя различными комбинациями:

- 1) TP – True Positive (истинно-положительное решение): модель нашла дефект на снимке, где он присутствует;
- 2) TN – True Negative (истинно-отрицательное решение): модель не обнаружила дефектов на снимке, где дефекты отсутствуют;
- 3) FP – False Positive (ложно-положительное решение): модель нашла дефект на снимке, где отсутствуют дефекты;
- 4) FN – False Negative (ложно-отрицательное решение): модель не нашла дефект, но на снимке он присутствует.

По рис. 1 видно, что в большинстве случаев по классу «Трещина» модель осуществляет верную классификацию, для класса «Яма или выбоина» модель чаще всего принимает истинно-отрицательное решение.

В табл. 1 также приведены метрики, используемые для оценки работы алгоритма, подготовленные на основе расчета показателей матрицы ошибок.

На рис. 2, 3 представлены результаты работы алгоритма по классам «Трещина»

Таблица 1
Метрики, используемые для оценки работы алгоритма

№ п/п	Наименование метрики	Значение
1	Точность	0.73
2	Прогностическая ценность положительного результата	0.64
3	Чувствительность	1.00
4	Специфичность	0.49



Рис. 2. Результат работы алгоритма по классу «Трещина» [выполнено авторами].



Рис. 3. Результат работы алгоритма по классу «Выбоина» [выполнено авторами].

и «Выбоина». По каждому снимку определены параметры площади, длины и ширины выявленных повреждений.

Разработанный алгоритм интегрирован в web-приложение «Система управления мониторингом состояния объектов жилищно-коммунального хозяйства (теплотрасс, благоустройства (газоны, парки, городские леса), зданий (кровля, фасады))» в части модуля управления мониторингом состояния региональных и муниципальных дорог.

ВЫВОДЫ

Создание более эффективных и оперативных методов неразрушающего контроля качества автомобильных дорог в условиях ограниченности ресурсов местных и региональных бюджетов является актуальной задачей. В данном контексте перспективными являются методы мобильного неразрушающего контроля качества дорог, позволяющие не подвергать дорожное полотно дополнительным воздействиям и не требующие остановки автомобильного потока на участке обследования.

Рассмотренные методы неразрушающего контроля состояния автомобильных дорог не в полной мере обеспечивают автоматизацию поиска и определения параметров повреждений дорожного полотна. Кроме того, ограничения рассмотренных методов, такие как сложность в интерпретации результатов, необходимость участия в интерпретации обученного специалиста, требования к наличию эталонной базы параметров автомобиль-

ной дороги, препятствуют возможности их широкого применения, в том числе для принятия управленческих решений ответственных лиц.

В рамках работы разработан алгоритм анализа состояния дорожного полотна, позволяющий в автоматическом режиме осуществлять детекцию дефектов дороги по снимкам, полученным при паспортизации автомобильных дорог с использованием комплекса измерительной аэродромно-дорожной лаборатории КП-514-RDT в комплекте с программным обеспечением IndorRoad и RDT-Line. При классификации дефектов и определении их параметров не требуется работа оператора. Детекция повреждений производится с использованием обученной нейронной сети. Разработанный алгоритм позволяет оперативно и без выезда на место оценить текущее состояние автомобильной дороги, определить участки, требующие ремонта, измерить параметры повреждений и оценочно определить стоимость возможных работ по текущему или капитальному ремонту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Учаева А. А. Дорожные условия и безопасность движения // Техника и технология транспорта. – 2020. – № 2 (17). – С. 9. EDN: SNQXFK.
2. Jiaying Chen, Xiaoming Huang, Binshuang Zheng, Runmin Zhao, Xiuyu Liu, Qingqing Cao, Shengze Zhu. Real-time identification system of asphalt pavement texture based on the close-range photogrammetry. Construction and Building Materials, Vol. 226, 2019, pp. 910–919. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.321.
3. Баканов К. С., Ляхов П. В., Айсанов А. С., Исаев М. М., Никулин Е. Д., Коблов П. С., Сергунова А. С., Селедников Н. В., Наумов С. Б., Князев А. С. Дорожно-





транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год. Информационно-аналитический обзор. [Электронный ресурс]: <https://media.mvd.ru/files/embed/4761994>. Доступ 22.09.2023.

4. Yuchen Wang, Bin Yu, Xiaoyu Zhang, Jia Liang. Automatic extraction and evaluation of pavement three dimensional surface texture using laser scanning technology. *Automation in Construction*, 2022, Vol. 141, 104410. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104410.

5. Xu Yang, Jianqi Zhang, Wenbo Liu, Jiayu Jing, Hao Zheng, Wei Xu. Automation in road distress detection, diagnosis and treatment. *Journal of Road Engineering*, 2024, Vol. 4, Iss. 1, pp. 1–26. DOI: 10.1016/j.jreng.2024.01.005.

6. Рада А. О., Акулов А. О., Никитина О. И. Разработка веб-приложения для мониторинга автодорог в системе цифрового управления регионом ресурсного типа // *Уголь*. – 2023. – № S12. – С. 117–123. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-117-123.

7. Третьяков С. А., Попов И. А. Анализ способов определения ровности покрытия автомобильных дорог // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 76–80. EDN: YMXHPV.

8. Дормидонтова Т. В., Домнин О. В. Выявление дефектов, определение толщины дорожной одежды гео-радиолокационным методом // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: сб. статей 77-й всероссийской научно-техн. конференции / Под редакцией М. В. Шувалова, А. А. Пищулева, В. Ю. Алпатовой*. – Самара: СГТУ, 2020. – С. 126–131. EDN: PWSSTT.

9. Ma, L., Li, Y., Li, J., Wang, C., Wang, R., Chapman, M. A. Mobile Laser Scanned Point-Clouds for Road Object Detection and Extraction: A Review. *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Iss. 10, 1531. DOI: 10.3390/rs10101531

10. Davidovich, M., Kuzmich, T., Vasich, D., Hiv, V., Brunn, A., Bulatovich, V. Methodology of Detection and Administration of Road Defects Based on Mobile Mapping Data. *Computer modeling in engineering and science*, 2021, Vol. 129, Iss. 1, pp. 207–226. DOI: 10.32604/cmes.2021.016071.

11. Милых В. А., Соколова О. С., Степкина Е. Ю. Способ диагностики ровности поверхности дорожного покрытия. Патент на изобретение RU 2519002 C2, 10.06.2014. Патентное ведомство: Россия. Заявка № 2012138844/03 от 10.09.2012. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002519002_20140610_C2_RU/. Доступ 21.02.2024.

12. Munawar, H. S., Hammad, A. W. A., Haddad, A., Soares, C. A. P., Waller, S. T. Image-Based Crack Detection Methods: A Review. *Infrastructures*, 2021, Vol. 6, Iss. 8, p. 115. DOI: 10.3390/infrastructures6080115.

13. Song, W., Jia, G., Zhu, H., Jia, D., Gao, L. Automated Pavement Crack Damage Detection Using Deep Multiscale Convolutional Features. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, Vol. 2020, Iss. 1. DOI: 10.1155/2020/6412562.

14. Pan, Y., Zhang, X., Cervone, G., Yang, L. Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, Vol. 11, Iss. 10, pp. 3701–3712. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2865528.

15. Iraldi, F., Al Maki, W. F. Damage Classification on Roads Using Machine Learning. 2021 International

Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA), Bandung, Indonesia, 2021, pp. 151–156. DOI: 10.1109/ICoDSA53588.2021.9617520.

16. Minh-Tu Cao, Quoc-Viet Tran, Ngoc-Mai Nguyen, Kuan-Tsung Chang. Survey on performance of deep learning models for detecting road damages using multiple dashcam image resources. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, Vol. 46, 101182. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101182.

17. Silva Vaz, E., Gasparello, L. F., Gouveia, L. T., Senger, L. J. Detecting damage in roads using convolutional neural networks. *Iberoamerican Journal of Applied Computing*, 2023, Vol. 11, Iss. 1, pp. 1089–1098. DOI: 10.1109/BigData.2018.8621899.

18. Мокрушин Н. Ю., Сперанский Д. В., Чудинов С. А. Автоматизированное обнаружение дефектов на дорожном полотне с применением сверточных нейронных сетей // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы XV Международной научно-техн. конференции. – Екатеринбург: УГЛУТУ, 2024. – С. 489–494. [Электронный ресурс]: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12844/1/konf_24_087.pdf. Доступ 21.02.2024.

19. Васильев П. В., Сеничев А. В. Применение нейросетевых технологий в задаче контроля поверхностных дефектов // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. – 2020. – № 1 (205). – С. 33–40. DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2020-1-33-40>.

20. Соболев Б. В., Соловьев А. Н., Васильев П. В., Подколзина Л. А. Модель глубокой сверточной нейронной сети в задаче сегментации трещин на изображениях асфальта // *Вестник донского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 63–73. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-63-73.

21. Канаева И. А., Иванова Ю. А., Спицын В. Г. Сегментация дефектов дорожного покрытия на основе формирования синтетических выборок с помощью глубоких генеративно-состязательных сверточных сетей // *Компьютерная оптика*. – 2021. – Т. 45. – Вып. 6. – С. 907–916. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-844>.

22. Кравцов С. С., Чантиева М. Э. Автоматическое обнаружение дефектов дорожного полотна при помощи сверточных нейронных сетей // *Colloquium-journal*. – 2022. – № 3 (126). – С. 42–47. DOI: 10.24412/2520-6990-2022-3126-42-47.

23. Мисюрин И. А., Якимов П. Ю. Обнаружение повреждений дорожного покрытия в видеопотоке автомобильного регистратора // *Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023): сб. тр. по материалам IX Международ. конф. и молодеж. шк. (г. Самара, 17–23 апр. 2023 г.): в 6 т. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем обраб. изобр. РАН – Фил. Федер. науч.-исслед. центра «Кристаллография и фотоника» РАН. – Самара, Изд-во Самар. ун-та, 2023, Т. 4: Искусственный интеллект / под ред. А. В. Нионоворова. – 2023. – 040382. [Электронный ресурс]: <http://repo.ssau.ru/handle/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Obnaruzhenie-povrezhdenii-dorozhnogo-pokrytiya-v-videopotoke-avtomobilnogo-videoregistratora-10572>. Доступ: 27.05.2024.*

Информация об авторах:

Рада Артем Олегович – директор института цифры Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия, rada.ao@kemsu.ru

Коньков Николай Юрьевич – начальник отдела разработок института цифры Кемеровского государственного университета, Кемерово, Россия, n.konkov@i-digit.ru.

Статья поступила в редакцию 18.02.2024, актуализирована 27.05.2024, одобрена после рецензирования 31.05.2024, принята к публикации 31.05.2024.