

Научная статья
УДК 528.721.1:625.8-047.36
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-640-653>
EDN: ULZMVY



МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ICP

Л.А. Пронина¹ ✉, В.Л. Быков¹, А.А. Федоровский², М.В. Новородская¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²Тюменский региональный геодезический центр,
г. Тюмень, Россия

✉ ответственный автор
pronina_lilia@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для объективной оценки состояния автомобильных дорог и своевременного принятия мер по борьбе с возникающими деформациями должен происходить регулярный мониторинг дорожного покрытия. Классические методы обследования долгое время включали только визуальный осмотр, в то время как развивающиеся в дорожной одежде микротрещины могли быть долгое время незаметны и впоследствии привести к большим операционным издержкам при ремонтах. Актуальной задачей является разработка методики мониторинга состояния автомобильных дорог, позволяющей выявлять изменения геометрии дорожного покрытия, включая анализ микрорельефа.

Методы и материалы. В современной практике для подробной оценки состояния дорожного покрытия используется трехмерное представление поверхности в виде массива точек лазерных отражений, полученных методами наземного и мобильного лазерного сканирования. Отслеживать и оценивать изменения дорожного покрытия, в том числе деформации, можно путем сравнения разновременных облаков точек, полученных стереофотограмметрическим методом. При этом необходимо минимизировать влияние погрешности внешнего ориентирования разновременных облаков, с помощью их взаимного ориентирования. Использовался опытный образец, оснащенный полнокадровой цифровой камерой и геодезическим приемником ГНСС. Между съемками, выполненными двумя маршрутами с разницей примерно в час, изменения на асфальтном покрытии в течение указанного времени были смоделированы с помощью специальных макетов для выполнения мониторинга, чтобы в материалах съемок были отображены как реальные деформации покрытия, так и симулированные изменения. Получены облака точек, каждое облако включало более 40 млн точек, для оптимизации процессов анализа они были прорежены до плотности 5 мм и обрезаны по границам исследуемого участка. Определение координат центров проекции снимков выполнялось в режиме RTK. Прореженные облака точек были импортированы в ПО CloudCompare (ENST, Франция) для выполнения анализа.

Результаты. Для исследования были построены фотограмметрические модели съемок, облака точек которых наложены друг на друга по элементам внешнего ориентирования. Анализ показывает отклонения, по которым уравнивание результатов наложений облаков точек невозможно. С применением алгоритма ICP приведен повторный анализ облаков точек после взаимного ориентирования, стабильным контуром сдвигая второе облако относительно первого, макеты, расставленные после первой съемки, показали реальные изменения. Установлено, что точность построения облаков по исходным параметрам внешнего ориентирования снимков недостаточна, а после интеграции облака точек с помощью алгоритмов ICP очевидны инструменты улучшения отображения.

Обсуждение и заключение. Существуют фотограмметрические съёмочные системы, достаточно простые в обращении и довольно недорогостоящие, на примере представленной модели. Установлено, что если за исходные данные принять только координаты центров проекций, полученные методом ГНСС определений, то точность ориентирования облаков точек будет недостаточной именно для мониторинга за деформациями, но при этом система имеет простоту конструкции, а применив современные алгоритмы ICP, возможно выполнить взаимное ориентирование двух разных временных съёмок с получением миллиметровой точности деформационных изменений. По снимкам можно выявлять трещины

© Пронина Л.А., Быков В.Л., Федоровский А.А., Новородская М.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

дорожного покрытия в динамике и прогнозировать изменения дорожной одежды. Применение образца системы как довольно недорогостоящего, простого оборудования возможно для нужд городского хозяйства, а также для оценки деформаций на участках (прокола прохода коммуникации, падение снаряда на участок дороги), для принятия мер оперативного реагирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мобильное лазерное сканирование, мониторинг дорожного покрытия, фотограмметрические модели съемок, элементы внешнего ориентирования, облака точек

Статья поступила в редакцию 05.05.2026; одобрена после рецензирования 03.07.2026; принята к публикации 21.08.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пронина Л.А., Быков В.Л., Федоровский А.А., Новородская М.В. Мониторинг деформаций дорожного покрытия стереофотограмметрическим методом с использованием алгоритмов ICP // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 4. С. 640-653. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-640-653>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-640-653>

EDN: ULZMVY

MONITORING ROAD PAVEMENT DEFORMATIONS BY ICP-BASED STEREO PHOTOGRAMMETRIC METHOD

Liliya A. Pronina¹ ✉, Vasily L. Bykov¹, Alexander A. Fedorovsky², Marina V. Novorodskaya¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

²Tyumen Regional Geodetic Center LLC

Tyumen, Russia

✉ corresponding author
pronina_lilia@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Regular road surface monitoring is essential for an objective assessment of road conditions and timely intervention to combat emerging deformations. Traditional survey methods have long been limited to visual inspection, while developing pavement microcracks could remain undetected for a long time, subsequently leading to significant repair costs. A pressing issue is the development of a road surface monitoring methodology that can detect changes in road surface geometry, including microrelief analysis.

Methods and Materials. In modern practice, a detailed assessment of road surface conditions uses a three-dimensional representation of the surface as an array of laser reflection points obtained by terrestrial and mobile laser scanning. Road surface changes, including deformations, can be monitored and assessed by comparing point clouds obtained using stereophotogrammetry at different times. This requires minimizing the influence of external orientation errors on the clouds obtained at different times by aligning them with each other. A prototype equipped with a full-frame digital camera and a GNSS geodetic receiver was used. Between surveys conducted along two routes approximately one hour apart, changes in the asphalt surface during the specified time were simulated using specialized monitoring mockups to ensure that the survey data reflected both actual pavement deformations and simulated changes. The resulting point clouds contained over 40 million points each. To optimize the analysis, they were thinned to a density of 5 mm and cropped at the boundaries of the study area. The coordinates of the image projection centers were determined in RTK mode. The thinned point clouds were imported into Cloud Compare software (ENST, France) for analysis.

Results. For the study, photogrammetric models of the surveys were constructed, with point clouds superimposed on one another using exterior orientation parameters. The analysis revealed deviations that made it impossible to align the point cloud superposition results. Using the ICP algorithm, a reanalysis of the point clouds was performed after mutual orientation, shifting the second cloud relative to the first using a stable contour. Models placed after the initial survey showed actual changes. It was established that the accuracy of cloud construction based on the

© Pronina Liliya A., Bykov Vasily L., Fedorovsky Alexander A., Novorodskaya Marina V., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

original exterior orientation parameters of the images was insufficient, and after integrating the point clouds using ICP algorithms, display improvements were evident.

Discussion and Conclusion. Photogrammetric survey systems exist that are relatively simple to use and relatively inexpensive, as exemplified by the presented model. It has been established that using only the coordinates of projection centers obtained using GNSS measurements as the initial data will result in insufficient point cloud orientation accuracy, specifically for deformation monitoring. However, the system is simple in design, and using modern ICP algorithms, it is possible to align two different time-lapse images, achieving millimeter-level accuracy in deformation changes. These images can be used to detect dynamic road cracks and predict road surface changes. This system, as a relatively inexpensive and simple piece of equipment, can be used for municipal needs, as well as for assessing deformations in specific areas (such as utility punctures or projectile impacts on road sections), to facilitate rapid response.

KEYWORDS: mobile laser scanning, pavement monitoring, photogrammetric survey models, exterior orientation elements, point clouds

The article was submitted: May 05, 2026; approved after reviewing: July 03, 2026; accepted for publication: August 21, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Pronina L.A., Bykov V.L., Fedorovsky A.A., Novorodskaya M.V. Monitoring road pavement deformations by ICP-based stereophotogrammetric method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (4): 640-653. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-640-653>

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи, поставленные Правительством РФ в области устойчивого развития России до 2030 г., требуют амбициозных и согласованных действий на национальном, региональном и глобальном уровнях [1].

Дорожные условия оказывают значительное влияние на режим и безопасность движения как отдельных автомобилей, так и потока транспортных средств в целом [1]. Для объективной оценки состояния автомобильных дорог своевременного принятия мер по борьбе с возникающими деформациями должен происходить регулярный мониторинг дорожного покрытия. Классические методы обследования долгое время включали только визуальный осмотр, в то время как развивающиеся в дорожной одежде микротрещины могли быть долгое время незаметны и впоследствии привести к большим операционным издержкам при ремонтах. В качестве одной из главных составляющих мониторинга необходимо рассматривать оценку изменений ровности дорожного покрытия. Ухудшение ровности приводит к увеличению коэффициента динамичности, росту величины необратимых деформаций и снижению прочности конструкций. Актуальной задачей является разработка методики мониторинга состояния автомобильных дорог, позволяющей выявлять изменения геометрии

дорожного покрытия, включая анализ микрорельефа. Длительное время мониторинг выполнялся на основе топографических планов, составленных по данным геодезических съемок. В настоящее время разработаны специальные методики обработки данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для упрощения и ускорения создания топографических планов, которые могут базироваться на различных автоматизированных методах. На основе всех предлагаемых методов предложена методика автоматизированного создания топографических планов по данным мобильного лазерного сканирования, учитывающая недостатки существующих методик их обработки [2], применительно не только к автомобильным дорогам, но и к городским территориям в целом.

Данные (ДЗЗ), к которым относятся космическая и аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование (ВЛС), являются ценным источником информации об объектах и местности. В результате обработки таких данных с помощью специализированных программных решений создаются различные информационные продукты: ортофотопланы, цифровые модели рельефа и местности, 3D-модели строений, карты, топопланы и другие материалы, используемые в разных отраслях экономики. Появление новых типов съемочной аппаратуры, увеличение объема данных, качественный

¹ Guidelines for the Use of mobile LIDAR in Transportation Applications/M. J. Olsen, G. V. Roe, C. Glennie, M. Reedy, D. Hurwitz, K. Williams, H. Tuss, A. Squellati, M. Knodler. 2013 . Режим доступа: www.TRB.org.

и количественный рост потребителей материалов ДЗЗ требует постоянного совершенствования программного обеспечения [3,4]. Данные ДЗЗ, один из элементов процесса актуализации цифровых карт – формирование и обновление объектов путем выявления изменений местности по разновременным высокодетальным аэрокосмическим изображениям. В настоящее время основным способом выявления таких изменений по-прежнему остается прямой визуальный анализ, реализуемый оператором-дешифровщиком наземного комплекса обработки видовой информации. Применение прогрессивных технологий выявления изменений позволит обеспечить повышение оперативности подготовки цифровых карт, в том числе по разнородным данным дистанционного зондирования (радарная съемка, лазерное сканирование) [5].

Одними из самых оперативных методов геодезической съемки, позволяющих выполнять создание цифровых моделей местности с высокой точностью и детализацией, в настоящее время являются аэрофотосъемка (АФС) и мобильное лазерное сканирование (МЛС). Оба этих метода позволяют получать информацию о местности в виде массива точек. Но вследствие того, что данные АФС записываются с воздушного носителя, а МЛС – с наземного, массив точек, полученный различными методами, отображает одну и ту же территорию с различной детальностью. Отсюда возникает необходимость совместного использования разнородных данных посредством их интеграции. В этом случае необходимо решить ряд задач, таких как привязка массивов точек, оценка зон видимости в зависимости от характера территории съемки, сохранение в итоговом объединенном массиве только тех точек в областях перекрытия, которые наиболее достоверно и полно описывают формы объектов местности, фильтрации ложных измерений [6]. Актуальность использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и основные способы построения цифровой модели с точки зрения геодезического обеспечения обоснованы в работе [1], здесь же рассмотрены основные программные продукты для обработки результатов съемки. Благодаря возможности захвата изображений с большим перекрытием и на значительных высотах, БПЛА позволяют создавать плотные облака точек высокого

разрешения при использовании алгоритма структуры их движения, допускающим идентифицировать и сопоставлять ключевые точки в области перекрытия в каждой паре изображений, и после уравнивания вычислить параметры взаимной ориентации камер, после чего создать разреженное облако точек [7,8,9].

Возникает задача интеграции разнородных данных ДЗЗ, в результате чего можно добиться построения ЦММ без «мертвых» зон [10,11]. Полную интеграцию разнородных данных можно выполнить в 3 этапа: привязка, формирование, распознавание [12]. Первый этап интеграции данных ДЗЗ, заключающийся в их привязке, может быть выполнен двумя основными способами: независимое внешнее ориентирование в определенной системе координат либо взаимное путем вычисления положения одного набора данных относительно другого [11]. Привязка по способу взаимного ориентирования может быть выполнена интерактивным способом путем идентификации соответственных точек [13] или автоматизированным – посредством применения методов автоматической идентификации соответственных точек и контуров [14,15]. Применение алгоритмов машинного обучения к облакам точек, полученных фотограмметрическим методом, позволяет формировать и распознавать данные в программе PHOTOMOD 8.0 и использовать для построения 3D-моделей данные аэро-, а также космической съемки без необходимости проведения наземной топографической съемки. Дальнейшая обработка полученных моделей требует информации о классе объектов (земля, здание, растительность и т. д.)²[16,17,18].

В современной практике для оценки состояния качества линейных сооружений используется трехмерное представление поверхности в виде массива точек лазерных отражений (ТЛО), полученных методами наземного и мобильного лазерного сканирования (МЛС). МЛС нашло широкое применение на железных и автомобильных дорогах [19]. Одним из направлений его использования на железных дорогах является контроль габаритов приближения строений. Определение габаритов таким способом повышает производительность полевых работ, компьютерная обработка позволяет создавать математическую модель объекта и при натурных измерениях распозна-

² Qi C., Yi L., Su H., Guibas L. J. (2017) PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric Space. *Advances in Neural Information Processing Systems*, [v1]Wed, 7 Jun 2017, pp. 5105–5114.

вать образ, что дает возможность определять габариты в реальном времени. Один проход системы по участку пути обеспечивает определение геометрии рельсовой колеи и фактических габаритов приближения строений [20].

Наземное лазерное сканирование (НЛС) является более точным методом и применяется для подробной съемки локальных участков дорог и мостовых сооружений. При выполнении НЛС плотность ТЛО зависит от расстояния от сканера до поверхности объекта. Для отображения на материалах съемки микрорельефа поверхности необходимо сокращать радиус сканирования и увеличивать число станций, что негативно сказывается на производительности данного метода.

МЛС выгодно отличается от НЛС высокой производительностью и используется для съемки участков большой протяженности, применительно к автомобильным дорогам. В настоящее время данный метод активно используется при технической инвентаризации автомобильных дорог. Однако плотность ТЛО при МЛС не позволяет подробно отобразить микрорельеф дорожного покрытия. Точность МЛС ниже, чем НЛС, что обусловлено изменением элементов внешнего ориентирования сканирующей системы при мобильном сканировании. Точность определения пространственных координат точек при МЛС достигает в среднем нескольких единиц сантиметров, но может падать до нескольких десятков сантиметров при неблагоприятных условиях.

Стандарты предназначены для применения субъектами геодезической и картографической деятельности, субъектами градостроительной и кадастровой деятельности при организации и выполнении работ по воздушному и наземному лазерному сканированию местности и пространственных объектов; регламентируют применение наземного мобильного, переносного и стационарного лазерного сканирования, а также воздушного лазерного сканирования с пилотируемых и беспилотных воздушных судов. В результате создания и применения разработанных документов обеспечена нормативная основа формирования общих и технических требований к процессу получения данных лазерного сканирования [21]. В статье представлены результаты оценки точности согласования цифровых моделей поверхности, полученных по данным аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна без точной привязки. Полученные модели этих участков подвергли корегистрации с помощью трех разных методик. Оценка результата про-

ведена на основе сравнения разностей высот цифровых моделей поверхности, согласованных корегистрацией и путем совместной фотограмметрической обработки исходных наборов аэрофотоснимков [22]. Корегистрация – процесс преобразования исходной модели таким образом, чтобы обеспечить ее оптимальное пространственное соответствие эталонной модели высот [23].

Существенным недостатком систем лазерного сканирования является их стоимость, которая для систем НЛС составляет от 2 до 19 млн руб., а для систем МЛС может превышать 100 млн руб.

В качестве более доступной альтернативы лазерному сканированию следует рассматривать метод стереофотограмметрической съемки, для реализации которого могут применяться неметрические цифровые камеры, имеющие относительно низкую стоимость.

Вопрос построения съемочных сетей при выполнении наземной стереофотограмметрической съемки с прямой пространственной привязкой центров проекции снимков рассмотрен в работе [24]. Представлено исследование влияния параметров конфигурации съемочной сети на точность локальных построений наземной стереофотограмметрической съемки. В рамках исследования рассмотрены случаи, когда в качестве опорных данных используются только координаты центров проекции снимков, полученные с помощью приемников глобальных навигационных спутниковых систем, а также случаи, когда помимо координат центров проекции используются приближенные значения угловых элементов внешнего ориентирования снимков. Для проведения исследования был использован современный метод имитационного моделирования. Данный метод основан на анализе фотограмметрических построений, которые состоят из имитационных снимков, полученных путем рендеринга трехмерной сцены в программном обеспечении (ПО) для 3D-моделирования Blender. Фотограмметрическая обработка имитационных снимков выполнялась в ПО Agisoft Metashape, при этом процессы обработки сгенерированных снимков были идентичны процессам обработки реальных снимков. На основе данных имитационного моделирования были получены зависимости и определены критерии оценки конфигурации съемочной сети для различных видов локальных построений наземной стереофотограмметрической съемки с прямой пространственной привязкой [24].

В качестве наиболее совершенного метода моделирования фотограмметрических съемок можно рассматривать метод, заключающийся в анализе фотограмметрических построений, состоящих из сгенерированных снимков – изображений, полученных путем рендеринга трехмерной сцены в специализированном ПО для 3D-моделирования [25].

Цифровые документы местности можно использовать в бесчисленном количестве областей нашей жизни как в гражданской и экономической, так и в военной сферах. Тип документов и способ создания отличаются в зависимости области применения, требуемой точности и цели дальнейшего использования. Виды цифровых документов местности: цифровые модели местности (ЦММ), цифровые модели рельефа (ЦМР), цифровые топографические карты (ЦТК), ортофотопланы местности и т.д. Целью данного исследования является использование компьютерного моделирования для имитации аэросъемки посредством аэрофотосъемки и лазерного сканирования с помощью беспилотного летательного аппарата для повышения достоверности и точности создания ЦМР и выбора оптимальных вариантов выполнения задачи в соответствии не только с требуемой точностью, но и со всеми критериями и условиями, которые нужны, чтобы достичь параметров, дающих наилучшие результаты при оптимальных финансовых и временных затратах³ [26].

Для съемки локальных участков может использоваться достаточно простая система наземной стереофотограмметрической съемки (НСС), состоящая из полнокадровой цифровой камеры, геодезической вехи и приемника ГНСС. Облака точек, созданные по данным НСС с близкого расстояния, сопоставимы с результатами лазерного сканирования и могут иметь более высокую плотность.

Отслеживать и оценивать изменения дорожного покрытия, в том числе деформации, можно путем сравнения разновременных ТЛО и/или облаков точек, полученных стереофотограмметрическим методом. При этом необхо-

димо минимизировать влияние погрешности внешнего ориентирования разновременных облаков, с помощью их взаимного ориентирования. Для решения этой задачи могут быть использованы итеративные алгоритмы ближайших точек (англ. Iterative Closest Point – ICP), получившие широкое распространение при решении задач компьютерного зрения, в том числе в задачах одновременной локализации и картографирования (англ. Simultaneous Localization and Mapping – SLAM)⁴. Принцип алгоритмов ICP заключается в сведении к минимуму разницы между двумя облаками точек за счет повторения последовательности процессов:

- формирование пар точек, в которых одна из точек принадлежит первому облаку, а вторая является ближайшей к ней точкой второго облака;
- вычисление параметров преобразования (сдвиг, поворот) под условием минимизации расстояний между точками в выбранных парах;
- преобразование одного из облаков точек по вычисленным параметрам.

Для первичной апробации методики мониторинга дорожного покрытия стереофотограмметрическим методом с использованием алгоритмов ICP был поставлен натурный эксперимент.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнена разновременная стереофотограмметрическая съемка асфальтированной площадки. Объект съемки имитировал локальный участок автомобильной дороги с деформациями асфальтобетонного покрытия (трещины, выбоины, сдвиги и т.д.).

В эксперименте использовался опытный образец системы НСС с прямой пространственной привязкой центров проекции снимков (рисунок 1)⁵, оснащенный полнокадровой цифровой камерой Nikon D800 и геодезическим приемником ГНСС.

³ Акель Мохаммад Амин. Разработка методики оценки влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы беспилотного воздушного судна на точность создания цифровой модели местности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 179 с.

⁴ Bai H. ICP algorithm: Theory, practice and its SLAM-oriented taxonomy //arXiv preprint arXiv:2206.06435. 2022.

⁵ Патент № 2762538 С1 Российская Федерация, МПК G01C 7/04. Способ мониторинга дорожного полотна автомобильных дорог : № 2021100197 : заявл. 11.01.2021; опубл. 21.12.2021 / В.Л. Быков, Л.В. Быков, А.Г. Мадиев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина».



Рисунок 1 – Съёмочная система НСС
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – NSS survey system
Source: compiled by the authors.

Съемка выполнялась двумя маршрутами по 9 снимков в каждом (рисунок 2). Наклон камеры составлял 60° от вертикального положения. Среднее расстояние от центра проекции до поверхности, отображаемой на снимке, равнялось 2,5 м. Определение координат центров проекции снимков выполнялось в режиме RTK от сети постоянно действующих базовых станций.

Фотограмметрическая обработка материалов НСС производилась в ПО Agisoft Metashape Pro (ООО «Живой Софт», Россия).

Для имитирования циклов мониторинга выполнена повторная съемка объекта. Разница между съемками составляла менее часа, что гарантировало отсутствие реальных изменений объекта за время проведения эксперимента. Изменения за период между циклами мониторинга были смоделированы с помощью специальных макетов длиной и шириной от 30 до 70 мм и высотой от 2 до 12 мм. Макеты были расставлены по площадке после первой съемки. Таким образом, на материалах съемок были отображены как реальные деформации покрытия (стабильны и отображены на материалах обеих съемок), так и симитированные изменения (присутствуют только на материалах второй съемки).

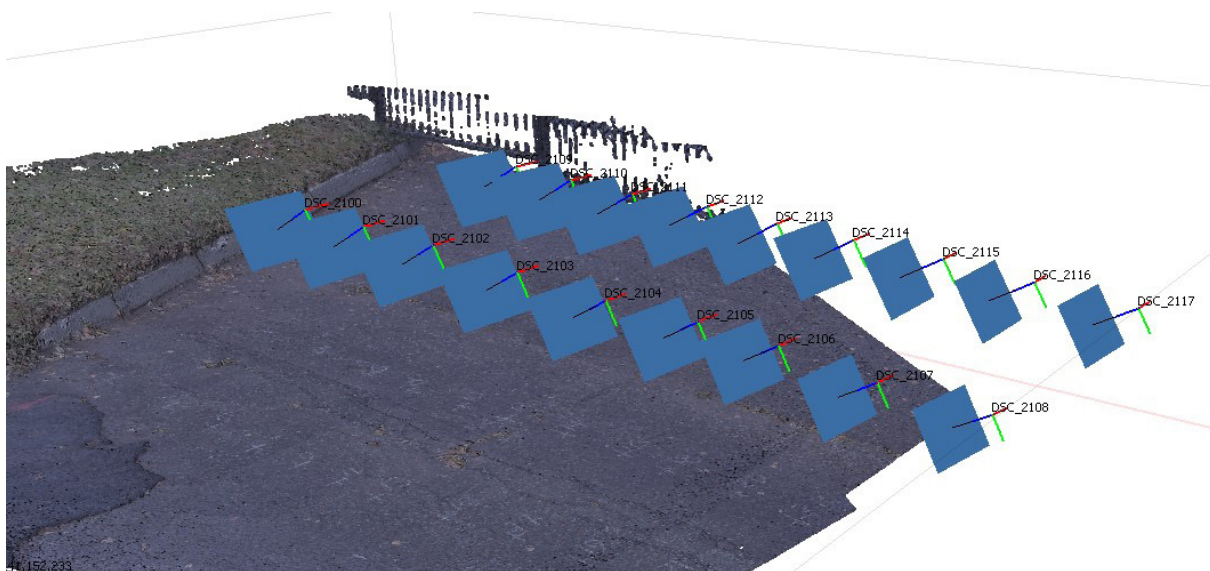


Рисунок 2 – Маршруты НСС
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – NSS Routes
Source: compiled by the authors.



а



б

Рисунок 3 – Фрагменты облаков точек: а – исходное; б – прореженное
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Point cloud fragments: a – original; b – downsampled
Source: compiled by the authors.

В результате фотограмметрической обработки материалов НСС для каждого цикла было построено плотное облако точек в реальной цветовой схеме с средней плотностью точек – 1мм (рисунок 3, а). Полученные облака имели высокое изобразительное качество и по дешифровочным свойствам были сопоставимы со снимками. Несмотря на небольшую площадь экспериментального участка, каждое облако включало более 40 млн точек. При обработке реальных объектов, площадь которых многократно превышает площадь экспериментального участка, такая плотность точек создаст крайне высокие требования к вычислительным ресурсам. Для оптимизации про-

цессов анализа облака точек были прорежены до плотности 5 мм и обрезаны по границам исследуемого участка, что позволило сократить число точек до 1,7 млн (рисунок 3, б).

Прореженные облака точек были импортированы в ПО Cloud Compare (ENST, Франция), где выполнялся дальнейший анализ, а именно:

- выполнено вычисление отклонений между разновременными облаками точек с исходными параметрами внешнего ориентирования;
- вычисление отклонений между разновременными облаками точек после взаимного ориентирования с помощью алгоритмов ICP.

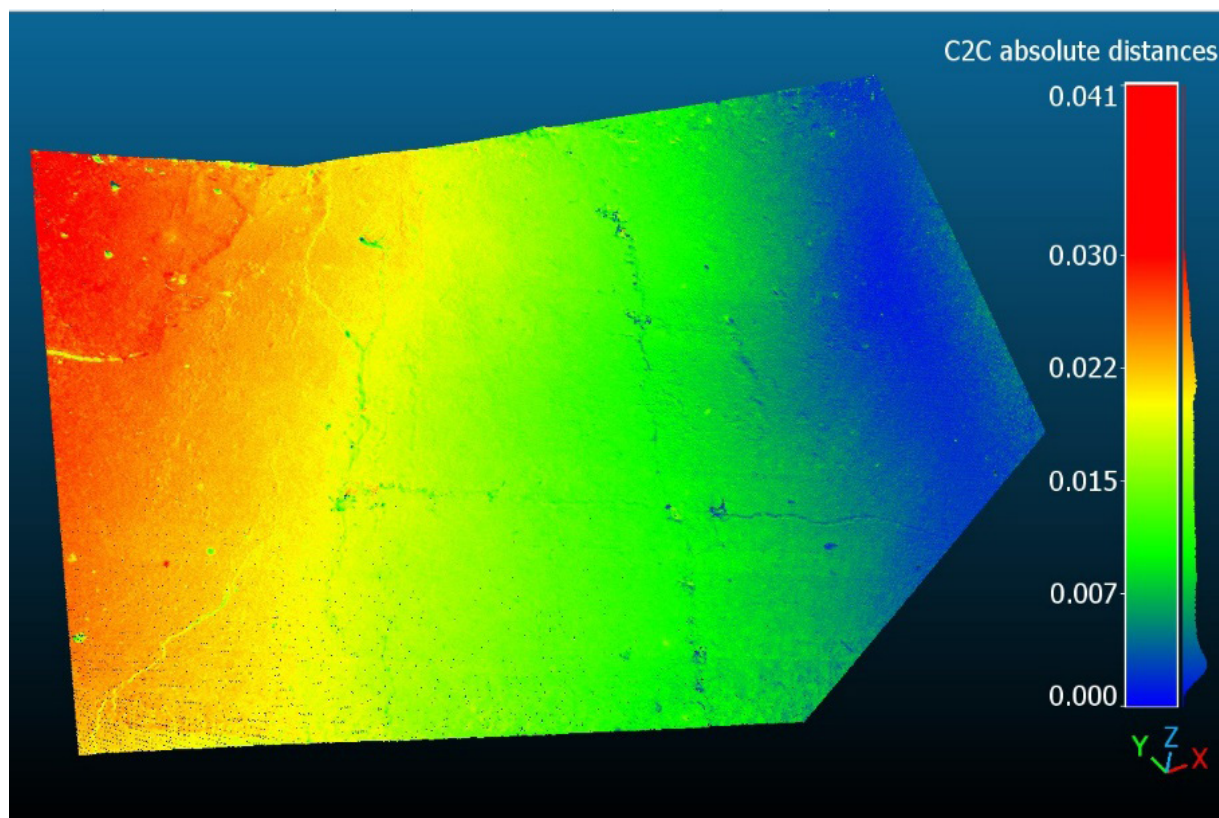


Рисунок 4 – Облако точек второго цикла после взаимного ориентирования по координатам ГНСС
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Point cloud of the second cycle after relative orientation using GNSS coordinates
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнивая результаты первой и второй съемок, между которыми в течение часа, кроме макетов ничего не изменилось, результаты съёмок должны полностью совпасть, единственно появились в некоторых местах локальные изменения. Для исследования по координатам ГНСС были построены фотограмметрические модели по первой и по второй съемке, облака точек которых наложены друг на друга по элементам внешнего ориентирования. На рисунке 4 приведено облако точек второй съемки в цветовой гамме, основанной на скалярном поле «C2C absolute distances», где точки окрашены в зависимости от расстояний до ближайших точек облака по первой съемке. Цветовая шкала справа указывает значения отклонений в метрах, соответствующих определенным цветам.

Анализ разновременных облаков точек с исходными параметрами внешнего ориенти-

рования показывает в красной зоне отклонения около 4 см там, где их быть не должно. На основании этого факта уравнивание результатов отклонений наложений облаков точек, полученных по элементам внешнего ориентирования с учетом координат ГНСС, невозможно.

Применив алгоритмы ICP, приведем анализ разновременных облаков точек после взаимного ориентирования с их использованием. По заведомо стабильным контурам сдвигаем второе облако относительно первого, чтобы оно максимально совпадало бы в частях красной цветовой гаммы. На облаке точек, после применения алгоритмов ICP, красными окружностями показаны макеты, расставленные по площадке после первой съемки, показывающие реальные изменения, а места, в которых изменений не было, попали в спектр от синего до зелёного цветов, характеризующие небольшой дребезг от 0 до 5 мм.

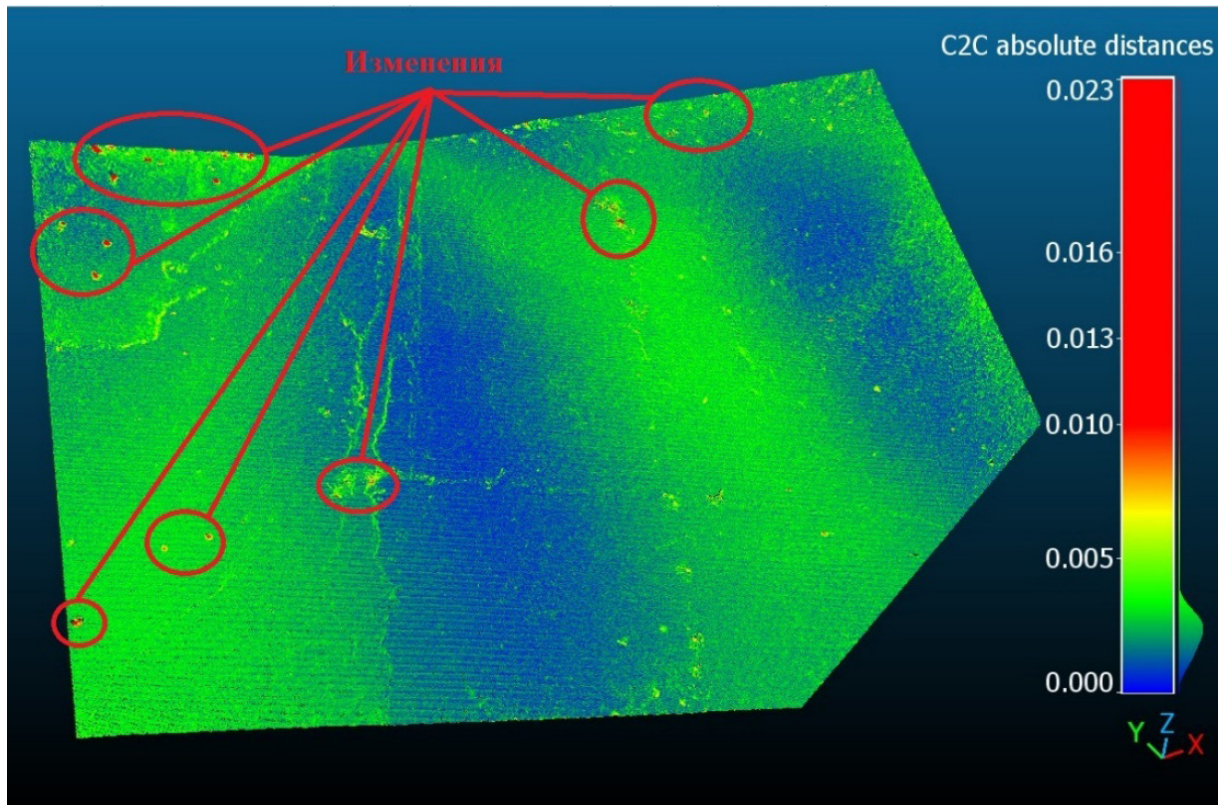


Рисунок 5 – Облако точек второго цикла после взаимного ориентирования с помощью алгоритмов ICP
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Point cloud of the second cycle after relative orientation based on ICP algorithms
Source: compiled by the authors.

В результате анализа рисунков 4 и 5 установлено, что точность построения облаков по исходным параметрам внешнего ориентирования снимков недостаточна, так как отклонение облаков точек на стабильных участках (не подверженных изменению) достигают 4 см, а после интеграции облако точек с помощью алгоритмов ICP, очевидны инструменты улучшения отображения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существуют современные фотограмметрические съёмочные системы, достаточно простые в обращении и довольно недорогостоящие. Одна из таких систем была нами воспроизведена и протестирована для мониторинга деформации дорожного покрытия.

При этом было установлено, что если за исходные данные принять только координаты центров проекций, полученные методом ГНСС определений, то получим недостаточную точность ориентирования этих облаков точек, недостаточную именно для мониторинга за

деформациями. Но при этом система имеет простоту конструкции, а применяя современные алгоритмы ICP, возможно выполнение взаимного ориентирования двух разных временных съёмок с получением миллиметровой точности деформационных изменений.

На рисунке 3 показано исходное облако точек, оно довольно фотореалистичное, по нему можно выявлять, как по фотографиям, выполненным в установленном временном промежутке трещины дорожного покрытия, даже проводить измерения их, поскольку трёхмерное облако точек трещин и других дефектов дорожного полотна покажет динамику, и прогнозировать дальнейшие изменения дорожной одежды.

Применение образца съёмочной системы НСС с прямой пространственной привязкой центров проекции снимка, представленного на рисунке 1, оснащенного полнокадровой цифровой камерой и геодезическим приемником ГНСС, как довольно не дорогостоящего и простого, но при локального вида оборудовании возможно для нужд городского хозяйства. К примеру, выполнив цельную съёмку какого-то

участка дороги (или в целом) с помощью мобильного лазерного сканера, сразу после ввода в эксплуатацию объекта, получив эталонную модель, сравнивая которую впоследствии с результатами НСС, установленной на автомобиль дорожной бригады, возможно оценивать деформации на потенциальных участках (прокол прохода коммуникации, падение снаряда на участок дороги), после чего возможна просадка дорожного полотна для принятия мер оперативного реагирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимофеев Е.Н., Севостьянов А.А., Сокольников А.В. Создание цифровой модели железнодорожного пути с использованием беспилотных летательных аппаратов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 1(68). С. 73–82. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_68_73
2. Алтынцев М.А., Комиссаров А.В., Алтынцев М.А. Автоматизированная сегментация и классификация данных мобильного лазерного сканирования для векторизации контурной части топографического плана городской территории // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29, № 6. С. 32–43. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-32-43>
3. Василенко Д.В. Разработка алгоритма классификации плотных облаков точек на примере городской застройки // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29, № 6. С. 44–52. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-44-52>
4. Сквазников М.А., Колыгин Д.Л. Оценка информативности разнородных признаков объектов дистанционного зондирования Земли // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29, № 5. С. 80–91. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-5-80-91>
5. Иванов В.Г., Кузина Е.И., Гоманов Д.Е. [и др.]. Мониторинг изменений местности по разновременным аэрокосмическим изображениям с применением технологий глубокого обучения нейронных сетей // Геодезия и картография. 2025. Т. 86, № 5. С. 39–46. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1019-5-39-46>
6. Алтынцев М.А. Методика интеграции данных мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для создания цифровой модели местности // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2022. Т. 27, № 5. С. 5–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-5-5-18>
7. Sahebdivani S., Arefi H., Maboudi M. Rail-track detection and projection-based 3D modeling from UAV point cloud // Sensors. 2020. Pt. 20, No. 18. P. 1–15.
8. Lesiak P. Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles // Problemy Kolejnictwa. 2020. No. 188. P. 115–127.
9. Rampriya R.S., Suganya R., Sabari Nathan P., Shunmuga Perumal A. A comparative assessment of deep neural network models for detecting obstacles in the real time aerial railway track images // Applied Artificial Intelligence. 2022. Pt. 36, No. 1. P. 1–34.
10. Hassan A.T., Fritsch D. Integration of laser scanning and photogrammetry in 3d/4d cultural heritage preservation - a review // International Journal of Applied Science and Technology. 2019. Vol. 9, No 2. P. 76–91.
11. Rönnholm P., Honkavaara E., Litkey P., Hyypä H., Hyypä J. Integration of laser scanning and photogrammetry // ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. 2007. Vol. XXXVI, Part 3 / W52, 2007. P. 355–362.
12. Алтынцев М.А. Методика интеграции данных наземного и воздушного лазерного сканирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2023. Т. 67, № 1. С. 26–41. <https://doi.org/10.30533/GiA-2023-007>
13. Urso M.G.D., Russo G. On the integrated use of laser-scanning and digital photogrammetry applied to an archaeological site // International Archives of ISPRS. 2008. Vol. XXXVII-B5. P. 1107–1112.
14. Han Y., Oh J. Automated geo/co-registration of multi-temporal very-high-resolution imagery // Sensors. 2018. Vol. 18. No 1599. <https://doi.org/10.3390/s18051599>
15. Гук А.П., Алтынцев М.А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 4. С. 68–77.
16. Василенко Д.В., Пермяков Р.В. Классификация фотограмметрических облаков точек, полученных по стереопарам космических снимков в ЦФС PHOTOMOD, для решения градостроительных задач // Геодезия и картография. 2025. Т. 86, № 4. С. 40–47. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1018-4-40-47>
17. Thomas H., Tsai Y.-H.H., Barfoot T. D., Zhang J. KPConvX: modernizing kernel point convolution with kernel attention. 2024 IEEE / CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 5525–5535. <https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00528>
18. Thomas H., Qi C. R., Deschaud J.-E., Marcotegui B., Goulette F., Guibas L. (2019) KPConv: flexible and deformable convolution for point clouds. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 6410–6419. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00651>
19. Щербakov В.В. Исследование мобильного лазерного сканера «Сканпуть» при определении геопрограммного положения железнодорожного пути // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25, № 2. С. 98–108. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108>

20. Щербаков В.В., Бунцев И.А., Щербаков И.В. [и др.]. Система мобильного лазерного сканирования для железных и автомобильных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 5(72). С. 106–115. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_72_106

21. Нехин С.С., Рубенок А.Н., Бабашкин Н.М., Ковров А.А. Техническое регулирование процессов лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2025. Т. 86, № 10. С. 45–54. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1024-10-45-54>

22. Зорина В.В., Энтин А.Л., Курамагомедов Б.М. Оценка точности результатов корегистрации цифровых моделей поверхности высокого пространственного разрешения // Геодезия и картография. 2025. Т. 86, № 11. С. 17–26. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1025-11-17-26>

23. Харченко С.В. Способ корегистрации цифровых моделей высот для получения гидрологически корректного представления земной поверхности // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54, № 3. С. 150–154.

24. Федоровский А.А., Быков Л.В. Влияние параметров конфигурации съемочной сети на точность наземной стереофотограмметрической съемки с прямой пространственной привязкой // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2024. Т. 68, № 2. С. 17–29. <https://doi.org/10.30533/GiA-2024-009>

25. Алтынов А.Е., Мохаммад А. Исследование влияния вариаций навигационных параметров съемочной системы (аэрофотосъемки, лазерного сканера) на точность создания ЦММ с помощью имитационного моделирования // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 110–120. <https://doi.org/10.17513/use.37833>

26. Slocum R.K., Parrish C.E. Simulated imagery rendering workflow for UAS-based photogrammetric 3D reconstruction accuracy assessments // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. No. 4. P. 1-19. <https://doi.org/10.3390/rs9040396>

REFERENCES

1. Timofeev E.N., Sevostyanov A.A., Sokolnikov A.V. Creation of a Digital Model of a Railway Track Using Unmanned Aerial Vehicles. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering*. 2024. No. 1 (68). Pp. 73-82. (in Russ.) https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_68_73
2. Altyntseva M.A., Komissarov A.V., Altyntsev M.A. Automated Segmentation and Classification of Mobile Laser Scanning Data for Vectorization of the Contour Part of the Topographic Plan of an Urban Territory. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2024. Vol. 29, No. 6. Pp. 32-43. (in Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-32-43>
3. Vasilenko D.V. Development of an algorithm for classifying dense point clouds using urban development as an example. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*.

2024. Vol. 29, No. 6. Pp. 44-52. (in Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-44-52>

4. Skvaznikov M.A., Kolygin D.L. Evaluation of the information content of heterogeneous features of Earth remote sensing objects. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2024. Vol. 29, No. 5. P. 80-91. (in Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-5-80-91>

5. Ivanov V.G., Kuzina E.I. Gomanov D.E. [et al.] Monitoring terrain changes based on multi-temporal aerospace images using deep learning technologies of neural networks. *Geodesy and Cartography*. 2025. Vol. 86, No. 5. P. 39-46. (in Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1019-5-39-46>

6. Altyntsev M.A. Methodology for integrating mobile laser scanning and aerial photography data to create a digital terrain model. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2022. Vol. 27, No. 5. P. 5-18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-5-5-18>

7. Sahebdivani S., Arefi H., Maboudi M. Rail track detection and projection-based 3D modeling from UAV point cloud. *Sensors*. 2020. Pt. 20, No. 18. Pp. 1-15.

8. Lesiak P. Inspection and maintenance of railway infrastructure with the use of unmanned aerial vehicles. *Problemy Kolejnictwa*. 2020. No. 188. P. 115-127.

9. Rampriya R.S., Suganya R., Sabari Nathan P. Shunmuga Perumal A comparative assessment of deep neural network models for detecting obstacles in the real time aerial railway track images. *Applied Artificial Intelligence*. 2022. Pt. 36, No. 1. P. 1-34.

10. Hassan A.T., Fritsch D. Integration of laser scanning and photogrammetry in 3d/4d cultural heritage preservation - a review. *International Journal of Applied Science and Technology*. 2019. Vol. 9, No. 2. P. 76-91.

11. Rönnholm P., Honkavaara E., Litkey P., Hyypä H., Hyypä J. Integration of laser scanning and photogrammetry. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser2007*. Vol. XXXVI, Part 3; W52, 2007. P. 355-362.

12. Altyntsev M.A. Methodology for integrating terrestrial and airborne laser scanning data. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2023. Vol. 67, No. 1. P. 26-41. (in Russ.) <https://doi.org/10.30533/GiA-2023-007>

13. Urso M.G., Russo G. On the integrated use of laser-scanning and digital photogrammetry applied to an archaeological site. *International Archives of ISPRS*. 2008. Vol. XXXVII-B5. P. 1107-1112.

14. Han Y., Oh J. Automated geo/co-registration of multi-temporal very-high-resolution imagery. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 1599. <https://doi.org/10.3390/s18051599>

15. Guk A.P., Altyntsev M.A. Automatic identification of corresponding points on aerial photographs of forest areas. *Bulletin of SSUGiT*. 2017. Vol. 22, No. 4. P. 68-77.

16. Vasilenko D.V., Permyakov R.V., Classification of photogrammetric point clouds derived from

satellite stereo pairs in the PHOTOMOD system for urban planning applications. *Geodesy and Cartography*. 2025. No. 4. P. 40–47. (in Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1018-4-40-47>

17. Thomas H., Tsai Y.-H. H., Barfoot T. D., Zhang J.KPConvX: modernizing kernel point convolution with kernel attention. 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2024; pp. 5525–5535. <https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.00528>

18. Thomas H., Qi C.R., Deschaud J.-E., Marcotegui B., Goulette F., Guibas L.KPConv: flexible and deformable convolution for point clouds. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019; pp. 6410–6419. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00651>

19. Shcherbakov V.V. Study of the mobile laser scanner “Scanput” in determining the geospatial position of a railway track. *Bulletin of SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2020. Vol. 25, No. 2. Pp. 98–108. (in Russ.) <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108>

20. Shcherbakov V.V., Buntsev I.A., Shcherbakov I.V. [et al.]. Mobile laser scanning system for railways and highways. *Bulletin of the Siberian State Transport University*. 2024. No. 5 (72). Pp. 106–115. (in Russ.) https://doi.org/10.52170/1815-9265_2024_72_106

21. Nekhin S.S., Rubenok A.N., Babashkin N.M., Kovrov A.A. Technical regulation of laser scanning processes. *Geodesy and cartography*. 2025. Vol. 86, No. 10. Pp. 45–54. (in Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1024-10-45-54>

22. Zorina V.V., Entin A.L., Kuramagomedov B.M. Accuracy assessment of coregistration results of high spatial resolution digital surface models. *Geodesy and cartography*. 2025. Vol. 86, No. 11. Pp. 17–26. (in Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1025-11-17-26>

23. Kharchenko S.V. Method of coregistration of digital elevation models to obtain a hydrologically correct representation of the earth's surface. *Geomorphology and paleogeography*. 2023. Vol. 54, No. 3. Pp. 150–154. (in Russ.)

24. Fedorovsky A.A., Bykov L.V. Influence of survey network configuration parameters on the accuracy of terrestrial stereophotogrammetric survey with direct spatial referencing. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. 2024. Vol. 68, No. 2. Pp. 17–29. (in Russ.) <https://doi.org/10.30533/GiA-2024-009>

25. Altynov A.E., Mohammad A. Study of the influence of variations in the navigation parameters of the survey system (aerial photography, laser scanner) on the accuracy of creating a digital terrain model using simulation modeling. *Advances in modern natural science*. 2022. No. 5. Pp. 110–120. <https://doi.org/10.17513/use.37833>

26. Slocum R.K., Parrish C.E. Simulated imagery rendering workflow for UAS-based photogrammetric 3D reconstruction accuracy assessments. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 4. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs9040396>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Пронина Л.А. Анализ экспериментальных данных, оформление графической информации, написание и оформление статьи.

Быков В.Л. Получение экспериментальных данных.

Федоровский А.А. Разработка и проведение экспериментальных исследований.

Новгородская М.В. Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по методикам обработки данных ДЗЗ.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Pronina L.A. Analysis of experimental data, graphic design, writing the manuscript.

Bykov V.L. Acquisition of experimental data.

Fedorovsky A.A. Development and implementation of experimental studies.

Novorodskaya M.V. State-of-the art analysis on methods for processing remote sensing data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пронина Лилия Анатольевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Геодезия и инженерные изыскания в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6727-3674>,

SPIN-код: 7854-7509,

e-mail: pronina_lilia@mail.ru

Быков Василий Леонидович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Геодезия и инженерные изыскания в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8151-7286>,

SPIN-код: 9218-2512,

e-mail: bvl55@yandex.ru

Федоровский Александр Александрович – канд. техн. наук, главный геодезист ООО «Тюменский региональный геодезический центр» («ТРГЦ») (625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 57/3).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-977X>,

SPIN-код: 8941-3006,

e-mail: fedorovski26@yandex.ru

Новгородская Марина Владимировна – ст. преп. кафедры «Геодезия и инженерные изыскания в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7154-4205>,

SPIN-код: 2522-9333,

e-mail: m.v.novorodskaya@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pronina Liliya A. – Ph.D.(Eng.), Associate Professor at the Department of Geodesy and Engineering Surveys in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI, (5 Mira Ave., Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6727-3674>,

SPIN-code: 7854-7509,

e-mail: pronina_lilia@mail.ru

Bykov Vasily L. – Ph.D.(Eng.), Head of the Department of Geodesy and Engineering Surveys in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Mira Ave., Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8151-7286>,

SPIN-code: 9218-2512,

e-mail: bvl55@yandex.ru

Fedorovsky Aleksandr A. – Ph.D.(Eng.), Chief Surveyor, Tyumen Regional Geodetic Center LLC (TRGC) (57/3 Lunacharskogo St., Tyumen, 625001).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-977X>,

SPIN-code: 8941-3006,

e-mail: fedorovski26@yandex.ru

Novorodskaya Marina V. – Senior Lecturer, Department of Geodesy and Engineering Surveys in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Mira Ave., Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7154-4205>,

SPIN-code: 2522-9333,

e-mail: mv.novorodskaya@gmail.com