

УДК 624.131.3; 551.4; 502(075.8)
DOI: 10.18799/29495407/2025/3/94
Шифр специальности ВАК: 1.6.7, 1.6.21
Научная статья

Мониторинг оползня с применением воздушного лазерного сканирования на примере объекта горнолыжной базы о. Сахалин

М.Ю. Баборыкин✉

ООО «Аэрогеоматика», Россия, г. Краснодар

✉baborykin.my@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты мониторинга оползневых процессов на территории горнолыжной базы, расположенной вблизи города Южно-Сахалинска на острове Сахалин. Исследование выполнено с применением современных методов воздушного лазерного сканирования, позволяющих получить детальные пространственные данные о состоянии склонов и характере их деформаций. Контроль наблюдений осуществлялся классическими геодезическими методами. Также в статье представлен контроль привязки массивов точек лазерных отражений относительно друг друга. Цель исследования – продемонстрировать возможности современного оборудования для выполнения мониторинга оползневых процессов в условиях сложного рельефа с использованием технологий воздушного лазерного сканирования. Были решены следующие задачи: создание цифровой модели рельефа исследуемой территории, выявление потенциально опасных участков склонов, оценка динамики развития оползневых процессов, разработка рекомендаций по обеспечению безопасности объекта. Методика исследования базируется на комплексном применении технологий воздушного лазерного сканирования, инструментальной геодезической съемке, геоинформационном анализе и математической обработке данных. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной методики для мониторинга оползневых процессов на аналогичных объектах. Полученные результаты позволяют повысить эффективность системы мониторинга как оползней, так и других опасных геологических процессов, и обеспечить безопасность эксплуатации инфраструктуры в сложных геолого-геоморфологических условиях.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, дешифрирование, мониторинг, оползень, воздушное лазерное сканирование, статическая модель, динамическая модель

Для цитирования: Баборыкин М.Ю. Мониторинг оползня с применением воздушного лазерного сканирования на примере объекта горнолыжной базы о. Сахалин // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 3. – С. 1–17. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/94

UDC 624.131.3; 551.4; 502(075.8)
DOI: 10.18799/29495407/2025/3/94
Scientific paper

Landslide monitoring using airborne laser scanning on the example of a ski resort on Sakhalin Island

M.Yu. Baborykin✉

LLC Aerogeomatika, Krasnodar, Russian Federation

✉baborykin.my@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of monitoring landslide processes in the area of a ski resort located near the city of Yuzhno-Sakhalinsk on Sakhalin Island. The study was conducted using modern airborne laser scanning methods, which allow for detailed spatial data on the condition of slopes and the nature of their deformations. The monitoring was carried out using traditional geodetic methods. The article also presents the verification of the alignment of laser reflection point arrays rela-

tive to each other. The aim of the research is to demonstrate the capabilities of modern equipment for monitoring landslide processes in complex terrain using airborne laser scanning technology. The following tasks were addressed during the study: creating a digital model of the terrain of the examined area, identifying potentially hazardous slope sections, assessing the dynamics of landslide processes, and developing recommendations for ensuring the safety of the site. The research methodology is based on the integrated use of airborne laser scanning technologies, instrumental geodetic surveys, geoinformational analysis, and mathematical data processing. The practical significance of the work lies in the applicability of the developed methodology for monitoring landslide processes in similar sites. The results obtained can enhance the effectiveness of the monitoring system for both landslides and other hazardous geological processes, ensuring the safety of infrastructure operation in complex geological and geomorphological conditions.

Keywords: digital elevation model, interpretation, monitoring, landslide, airborne laser scanning, static model, dynamic model

For citation: Baborykin M.Yu. Landslide monitoring using airborne laser scanning on the example of a ski resort on Sakhalin Island. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 3, pp. 1–17. DOI: 10.18799/29495407/2025/3/94

Введение

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) – это высокотехнологичная топографо-геодезическая методика сбора геопространственных данных по рельефу и наземным объектам, а также картографирования местности в трёхмерном режиме с летательного аппарата.

При съёмке сканер производит от двух до нескольких десятков измерений на каждый квадратный метр территории, что позволяет получать высокоточную цифровую модель рельефа.

Технология активно применяется для создания цифровых моделей городов, обследования линейных объектов, топографической съёмки рельефа, инвентаризации лесов, моделирования районов разработки полезных ископаемых, съёмки водных объектов (включая создание моделей дна) [1–11].

Важное преимущество метода заключается в возможности получения данных даже в труднодоступных районах фиксируя нано-, микро-, мезо- и макроструктуру рельефа.

Методы и материалы

Основными методами мониторинга являются классические геодезические наблюдения, позволяющие определять координаты деформационных марок (ДМ) с высокой точностью. Однако классический геодезический метод имеет свои ограничения. Первоначальная установка ДМ должна учитывать блоки (кластеры) появившегося оползня, или необходимо заложить ДМ максимально корректно на оползнеопасном склоне, где оползень ещё не сформировался, но при антропогенной нагрузке может появиться [2, 3, 6, 10, 12, 13]. В этом случае можно применять ВЛС, что позволит контролировать весь склон. Впервые в России масштабно мониторинг при помощи ВЛС был применен во время проведения инженерных изысканий в 2010–2012 гг. на объекте «Южный Поток» [14]. Методика проведения мониторинга с применением ВЛС в 2017 г. получила

патент [15]. Дальнейшее развитие оборудования позволило выработать дополнительные мероприятия, позволяющие улучшить точность определения точек лазерных отражений (ТЛО) в пространстве, а дополнительные мероприятия при повторных сканированиях для мониторинга не позволяют накапливать ошибки по точности [8, 12–21].

Автор [14] утверждает, что на 1 м² должно быть не менее 10 ТЛО от поверхности грунта, для более качественного наблюдения – от 50, в этом случае фиксируются изменения наноструктуры рельефа (появления бугров, западин, потяжин, трещин и т. п.). Последующее сканирование должно производиться по той же траектории, тем же оборудованием и при тех же «условиях солнечной погоды» (космическая погода и состояние Солнца, геомагнитные бури на Земле), а также высота от поверхности сканирования не должна превышать 100 м (как правило, для этого используется лазерный высотомер и функция повторения рельефа), если требуется достичь точности ВЛС в 3–4 см. Вышеуказанное ВЛС для мониторинга на объекте «Южный Поток» производилось с погрешностью 6 см в 2010–2012 гг., высота сканирования составляла порядка 500 м [14].

Мониторинг на объекте горнолыжной базы возле города Южно-Сахалинска на о. Сахалин выполнялся по доработанной методике. Участок исследований преимущественно имеет денудационно-эрозионный рельеф. Западная часть подножья Сусунайского хребта в зоне расположения исследуемого участка имеет уклоны, не превышающие 20–25°. Сами склоны участка относятся к низкогорному расчленённому рельефу. Исходя из этих геоморфологических параметров была подобрана схема выполнения временного ряда сканирования участка.

Некоторые характеристики, при которых производилось сканирование: высота сканирования над уровнем земли в пределах 50–90 м, шаг установки специальных опознавательных знаков на данном участке исследований составил 250 м, оборудование

для сканирования нестандартной сборки, подбирается индивидуально под решаемые задачи, вот некоторые требования: плотность ТЛО – до 300 точек/м²; программно-аппаратный комплекс для позиционирования, лазерных сканеров и другого оборудования, в том числе в условиях плохого сигнала GNSS. Стандартная сборка позволяет получить данные для мониторинга с погрешностью порядка 6–8 см, а при использовании штатной инерциальной системы, проведении трансформаций из одной системы координат в другую, отсутствии опознавательных знаков может приводить к погрешности до 20 см, что не позволяет применять такие данные для мониторинга опасных геологических процессов (ОГП).

Применялись опознавательные знаки особой конструкции (съёмные, складные – конструкция рассматривается для подготовки патента на полезную модель), разработанные автором статьи для мониторинга при поддержке российской компании, выпускающей сканирующие системы ООО «АГМ-Системы». Скоростные характеристики при сканировании для мониторинга и конструкция опознавательных знаков особой конструкции является Ноухау и в данной статье раскрываться не будут.

Материалы

Прежде чем приступить к мониторингу, первоочередной задачей является определение границ того или иного опасного геологического процесса, в нашем случае оползня [1–8, 12, 13, 16, 17, 22–28]. Так как в практике инженерных изысканий относительно давно применяется ВЛС, автором статьи разработана методика дешифрирования цифровой модели рельефа (ЦМР) и/или цифровой модели местности (ЦММ) с целью получения качественных и количественных характеристик ОГП, в данном случае оползней [12, 16, 22–24].

Помимо выработанного масштабного ряда данных ВЛС для топопланов, на которых видно, какой геологический процесс прослеживается и насколько устойчиво определяются его признаки [1, 2, 5, 6, 9–13, 18–21, 28–30], сформулированы три уровня дешифрирования:

- высокий уровень – выявление оползневых и оползнеопасных зон на мезорельефе, анализ ЦМР и/или ЦММ;
- средний уровень – сегментирование, выделение бровок срыва, типов оползневых тел по механизму;
- низкий уровень – выделение блоков (кластеров) на оползневых телах.

Особенности метода ВЛС

Преимущества:

- короткая технологическая цепочка;
- уменьшение наземных геодезических работ;
- высокая производительность;

- возможность получения данных в форме интенсивности отражений.

Выходные данные:

- массив ТЛО с координатами X, Y, Z ;
- интенсивность отражения.

Дополнительное применение при мониторинге:

- опережающие карты;
- выявление потенциально опасных участков, которые не были по каким-либо причинам учтены при первоначальном дешифрировании, смещение коридора интересов. Так как сканирование производится более широкой полосой, чем требуется для исследования участка, исследования проводятся в границах этого участка, остальная полученная информация о рельефе не задействуется и, как правило, какое-то время хранится, давая возможность как вернуться к нулевой или первоначальной модели, так и сместить коридор интересов по всему массиву ТЛО;
- определение мест установки, в случае необходимости, дополнительного оборудования;
- формирование статических моделей [26] после каждого сканирования;
- формирование динамических моделей [26] при анализе разновременных статических моделей;
- выявление подвижек в «слепых зонах»;
- анализ общих перемещений по склону и т. д.

Математическая обработка

В результате лазерного сканирования формируется массив ТЛО, где каждая точка обладает комплексным набором характеристик [9]. Основными параметрами выступают три пространственные координаты (X, Y, Z) [9, 18–21, 31], дополненные показателями: интенсивности отражения (I) и момента фиксации (t). Подобная многопараметрическая структура данных позволяет создавать как статические, так и, при повторном сканировании, динамические модели исследуемых объектов.

Ключевыми числовыми показателями каждой такой точки служат координаты (X_p, Y_p, Z_p), определённые в установленной системе отсчёта [32]. Совокупность этих точек формирует объёмное представление объекта, пригодное для визуального анализа, измерительных работ и применения методов геоморфологического исследования.

Современные системы ВЛС обладают возможностью фиксировать не только пространственное положение отражающих точек, но и интенсивность вернувшегося сигнала (I) [32]. Этот параметр отражает количество энергии, достигшей приёмника после отражения. Величина интенсивности определяется комплексом факторов: спектральными характеристиками отражающей поверхности, дистанцией до объекта, атмосферными условиями, степенью рассеивания, фоновым излучением среды.

Примечательно, что распределение интенсивности отражённого сигнала по информативности сопоставимо с чёрно-белыми аэрофотоснимками. Это свойство существенно расширяет возможности визуального анализа и дешифрирования данных даже при отсутствии традиционных аэрофотоматериалов.

Завершая описание структуры массива ТЛО, следует добавить временной параметр (t) к базовому набору характеристик (X_p, Y_p, Z_p, I). Такое расширение позволяет сформировать полное определение набора данных в массиве ТЛО или набора лазерно-локационных данных (L), включающего все перечисленные параметры для каждой зарегистрированной точки. Формирование математического определения набора лазерно-локационных данных описывается формулой [32]:

$$L = \{X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}, I_i, t_i\} \quad i=1 \dots N,$$

где L – весь рассматриваемый набор лазерно-локационных данных; N – общее количество лазерных точек в наборе L ; I – интенсивность отражённого импульса; i – количество точек лазерных отражений в статической модели; t – время регистрации единичной лазерной точки.

Отсюда набор данных мониторинга M формально определяется как [32]:

$$M = \{L, L + \Delta T_j\} \quad j=1 \dots K,$$

где K – общее количество режимных наблюдений в процессе мониторинга; T – время регистрации мас-

сива лазерных точек; j – количество точек лазерных отражений в динамической модели.

Практическая реализация

Исследуемый участок расположен в районе Сунайского хребта, восточная часть г. Южно-Сахалинска, о. Сахалин. Основную площадь занимает эрозионно-денудационный средне расчлененный рельеф, сформированный на устойчивых к агентам денудации метаморфических образованиях. Неотектонические поднятия территории обусловили проявление интенсивной донной эрозии, широкое развитие склонов делювиального (до 16°), реже делювиально-коллювиального (до 25°) сноса.

В пределах исследуемой территории выявлены криогенные и оползневые процессы.

Мерзлотные (криогенные) процессы связаны с промерзанием грунтов.

Оползневые (гравитационные) процессы распространены в центральной части исследуемого участка, на вогнутом склоне, осложнённом техногенной нагрузкой, грунтовыми дорогами, нарезанными в виде полок, и строительством коттеджей в верхней части склона с выравниванием и планированием строительных площадок. Оползневые процессы, выявленные в пределах исследуемой территории, имеют ярко выраженные элементы: бровки срыва и трещины зияния. Контуры оползня в рельефе хорошо видны. Выделяются два оползневых явления, расположенных в северной части участка и затрагивающих северо-восточный борт котлована (рис. 1).



Рис. 1. Фрагмент спутникового снимка с оползневыми явлениями
Fig. 1. Fragment of a satellite image showing landslide phenomena

Оползень № 1, расположенный в северо-западной части котлована, является техногенным, затронувшим борт котлована и часть габионных сооружений (рис. 2). Оползень № 2 является массивным, затронувшим одну третью часть склона,

повредив: борт котлована, габионное сооружение, асфальтированную дорогу (в связи со сходом оползня проезд по ней закрыт), а также грунтовую дорогу, расположенную выше по склону (рис. 3).

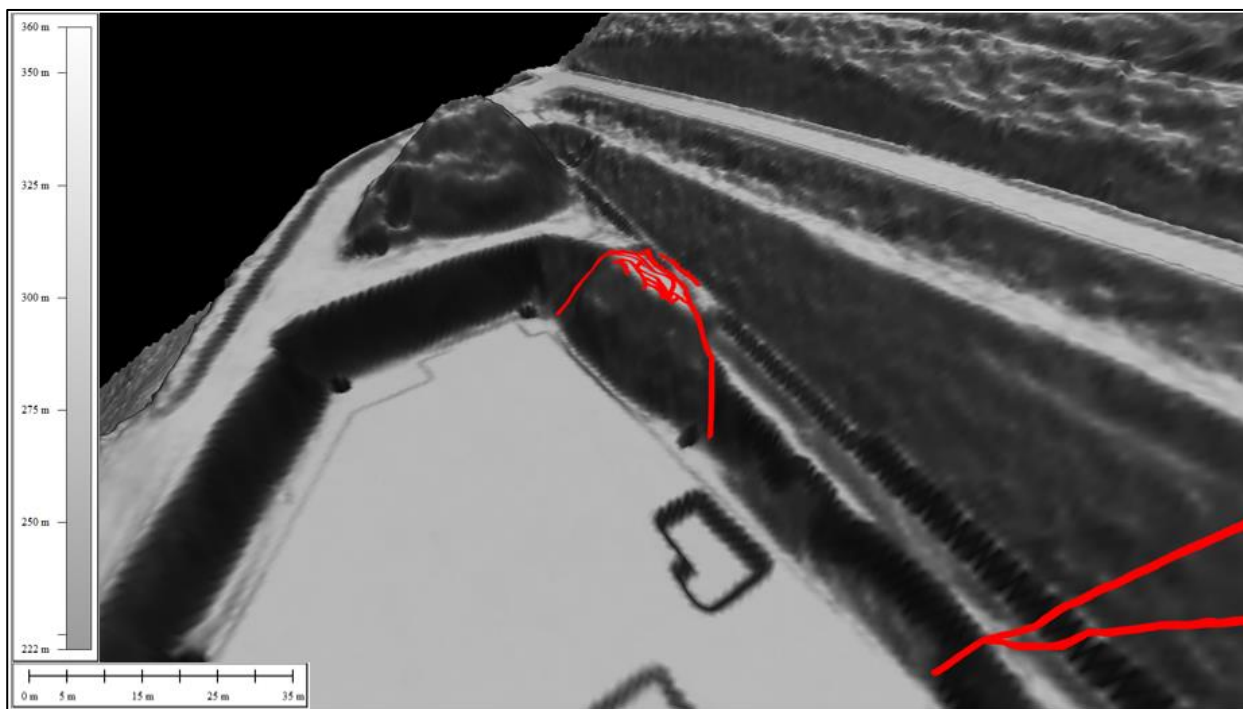


Рис. 2. Фрагмент ЦМР с оползнем № 1 (нулевая статическая модель)

Fig. 2. Fragment of the Digital Elevation Model with landslide no. 1 (zero static model)

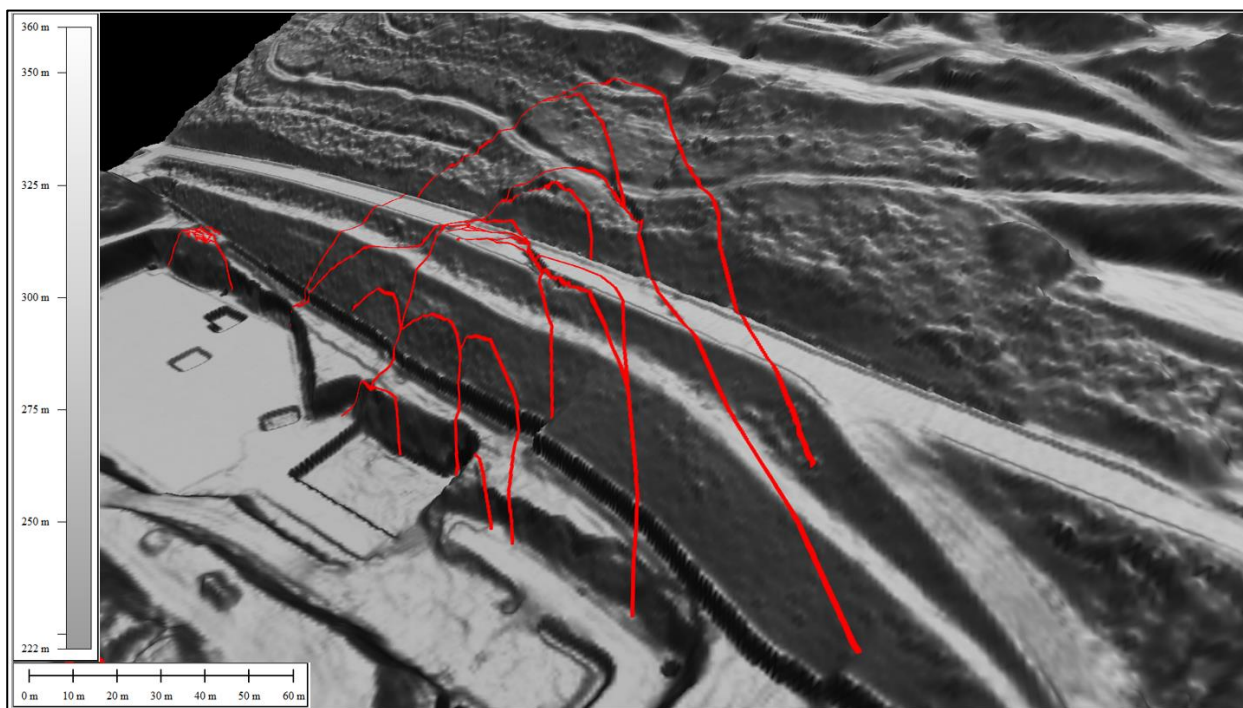


Рис. 3. Фрагмент ЦМР с оползнем № 2 (нулевая статическая модель)

Fig. 3. Fragment of the Digital Elevation Model with landslide no. 2 (zero static model)



a/a

б/б

Рис. 4. Космоснимок с водопрооявлениями в сухую погоду: а) в 10 м выше по склону над наивысшей точкой бровки срыва оползня; б) в восточном углу углубленного котлована в подошве оползня

Fig. 4. Satellite image showing water seepage in dry weather: a) 10 meters higher on the slope above the highest point of the landslide edge; b) in the eastern corner of the deepened pit at the base of the landslide

Склоны как в северной, так и в южной частях участка, являются оползнеопасными, так как участок находится вблизи зоны надвига, и усложнены разрывными нарушениями.

Разгрузка грунтовых вод (водопрооявление) зафиксирована по космоснимкам сверхвысокого разрешения, взятого из открытых источников и скомпилированного с ВЛС. Два водопрооявления: первое обнаружено над оползневым телом № 2 в 10 м выше по склону (рис. 4, а), второе – в котловане, в подошве оползневого тела (рис. 4, б).

На участке прослеживаются зона надвига, линейaments разрывных нарушений и зона повышенной трещиноватости (рис. 5). Тектоника выделялась по данным ВЛС на основе дешифровочных признаков [1, 2, 5, 12].

В результате тектонических процессов, обусловленных надвиговыми движениями Бурейской тектонической пластины по отношению к Симинской, формируется отчётливо выраженный геоморфологический уступ в северной части исследуемого региона. Данный структурный элемент отчётливо проявляется в современном рельефе.

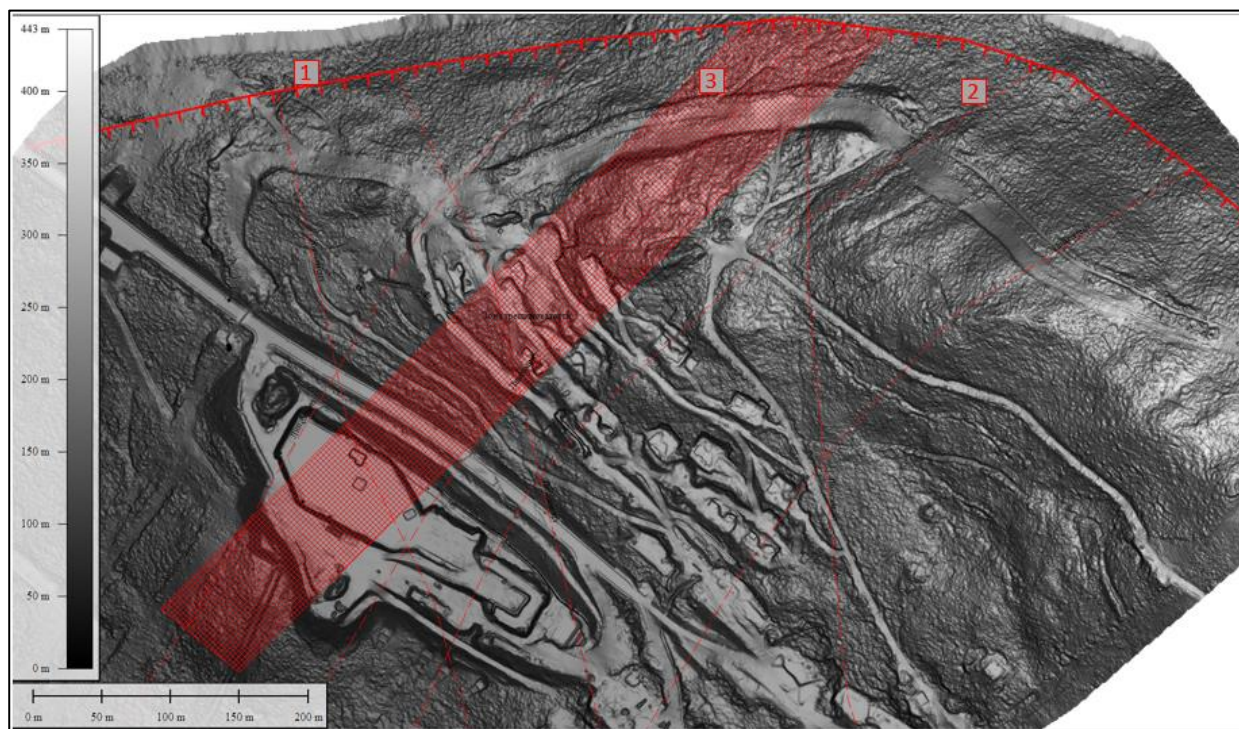


Рис. 5. Фрагмент ЦМР с выделенной зоной надвига (1), линейaments (2) и зоной повышенной трещиноватости (3)

Fig. 5. Fragment of the Digital Elevation Model with the highlighted thrust zone (1), lineaments (2), and an area of increased fracturing (3)

Система линеаментов генетически связана с зоной надвига и демонстрирует характерное радиальное распространение от области сочленения Буреинской и Симинской тектонических пластин вдоль Западно-Сусунайской шовной зоны (рис. 5).

Современная геодинамическая активность выявленных линеаментных структур находит своё проявление в активизации экзогенных процессов, в частности в формировании оползневых комплексов на исследуемой территории.

Надвиг в сочленении Буреинской пластины и Западно-Сусунайской шовной зоны течения и метаморфизма в геоморфологическом плане образу-

ет понижения в локальных водоразделах (северная часть участка исследования). Зона надвига частично проявлена в локальном водоразделе, образуя геоморфологические уступы на локальном водоразделе (данные ВЛС от июля 2024 г.), зона повышенной трещиноватости выходит на поверхность и дешифрируется на космоснимке сверхвысокого разрешения в зоне локального водораздела (рис. 6).

Активизация оползневой процесса при строительстве, что зафиксировано по данным ВЛС от июля 2024 г. (рис. 7), произошла в момент углубления котлована.



Рис. 6. Фрагмент космоснимка с признаками зоны повышенной трещиноватости. Признаки границ указаны красными стрелками

Fig. 6. A fragment of a space image with signs of a zone of increased fracturing. Red arrows indicate the boundary signs

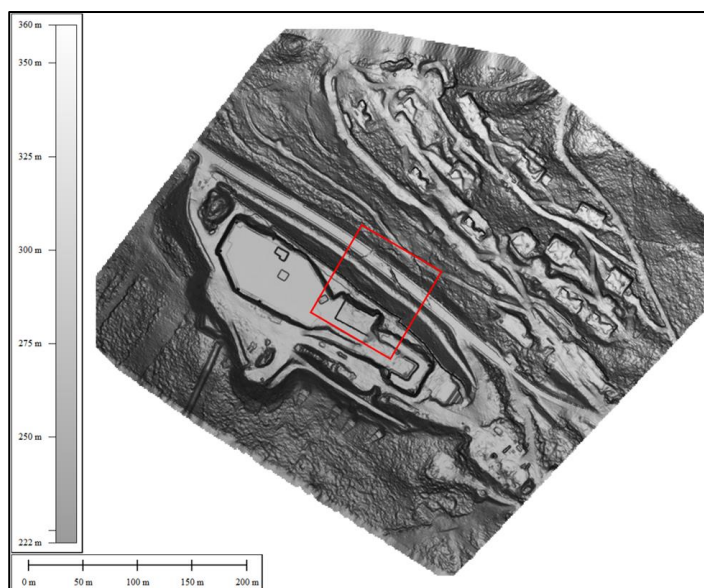


Рис. 7. ЦМР, построенная по данным ВЛС от июля 2024 г. Красным прямоугольником выделен участок углубления котлована и части зоны активизации оползня

Fig. 7. Digital Elevation Model built from airborne laser scanning data from July 2024. The red rectangle highlights the area of the pit deepening and parts of the landslide activation zone

Методика мониторинга оползневых процессов предусматривала комплексный подход, включающий два основных компонента: режимные наблюдения в реперных точках по профильным линиям (классические геодезические наблюдения) и сплошную съёмку склонового участка в зоне развития оползневых деформаций (ВЛС). Накопленный материал при сканировании сохраняется и может быть использован в дальнейшем как ретроспективная модель.

Учитывая, что технология ВЛС на данный момент не может сравниться по точности с классическими геодезическими наблюдениями, выполненными с погрешностями равными 20 мм в плане и 10 мм по высоте [33], необходимо не только использовать комбинированные наблюдения, но и производить проверку привязки временного ряда массивов ТЛО [7, 8, 14, 15, 17, 32].

Метод проверки привязки временного ряда массивов ТЛО заключается в выборе нескольких мест с заведомо не деформированной открытой местностью (которая в период наблюдений также не будет деформирована) и стыке неизменного участка с измененным (желательно с закрытой местностью, т. е. с растительностью) (рис. 8).

На представленных профилях проверки привязки временного ряда массивов ТЛО видно, что массивы ТЛО при относительной привязке повторяют в точности конфигурацию объекта в неизменной

зоне – не подвергшейся деформации: на профиле 1-1, расположенном на асфальтированном участке автодороги (рис. 9), и на профиле 4-4, где виден стык двух зон не измененной – уклон с растительностью по профилю от 0 до 25 м, и измененной зоной, находящейся в части планируемой территории от 25 до 45 м по профилю (рис. 10).

Первое сканирование осуществляется в системах координат WGS-84 с системой высот WGS-84 на эллипсоиде. При этом трансформацию в другие системы координат производить при сравнении статических моделей во временном ряду категорически запрещается, а последующие сканирования во временном ряду уравниваются по опознавательным знакам особой конструкции, это позволяет, во-первых, уменьшить погрешность за счет трансформации в другие системы координат, во-вторых, избежать накопительной среднеквадратической ошибки при последующих сканированиях и трансформациях. Опытным путём, совместно с производителями российских сканирующих систем ООО «АГМ-Системы», выведены высотные характеристики сканирования для достижения абсолютной точности 3 см и удаленность опознавательных знаков друг от друга для относительной привязки и уравнивания высот. Высоты сканирования составляют до 98 м над уровнем земли, а предельная удаленность опознавательных знаков на сегодняшний день является коммерческой тайной.

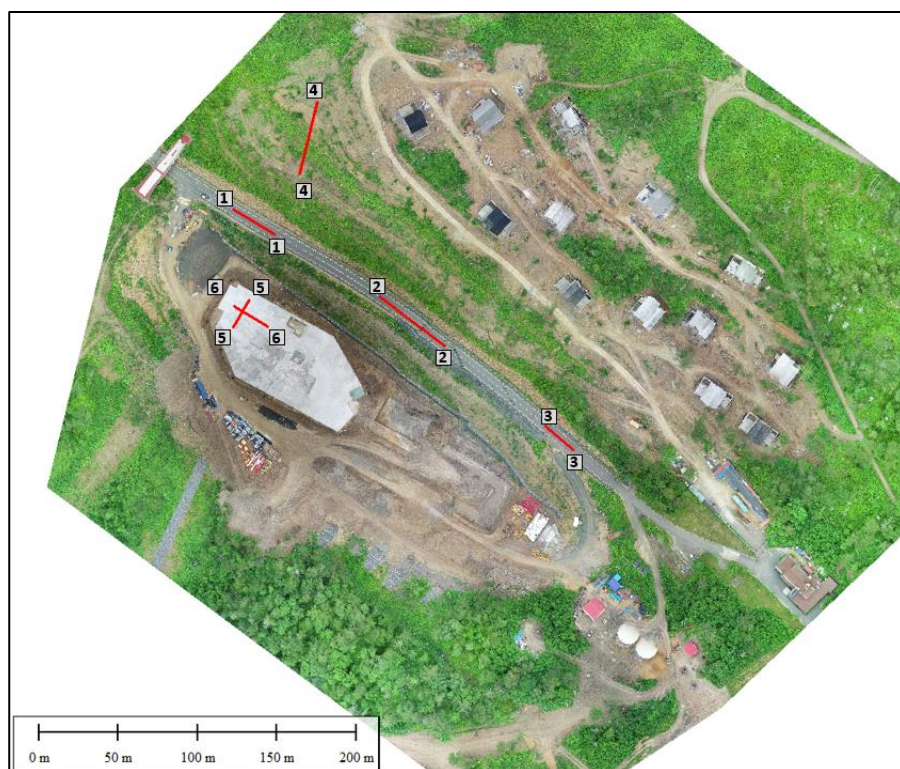


Рис. 8. Космоснимок с профилями проверки привязки временного ряда массивов ТЛО

Fig. 8. Satellite image with profiles for checking the binding of a time series of arrays of laser reflection points

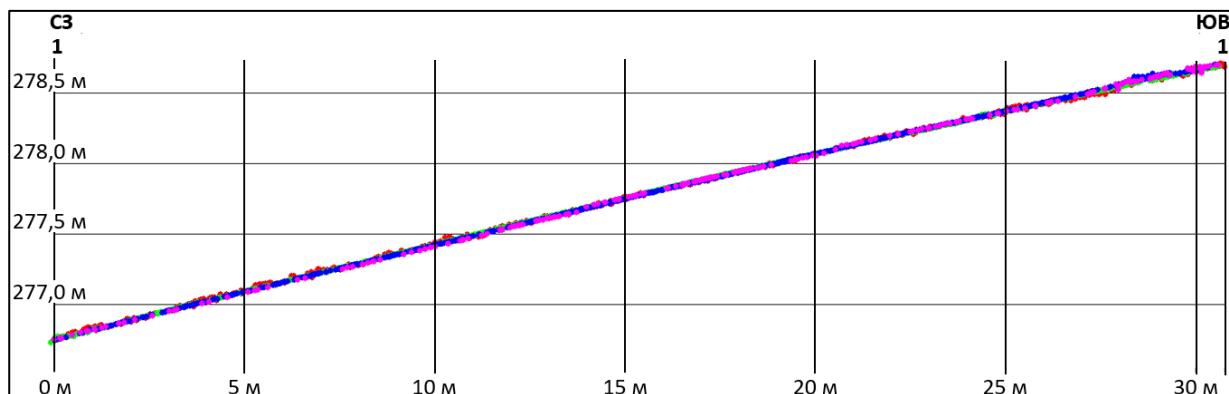


Рис. 9. Временной ряд массива ТЛО по проверочному профилю 1-1 на открытой местности. ТЛО красного цвета – от 06.07.2024, зеленого – от 17.07.2024, синего – от 25.07.2024, сиреневого – от 05.08.2024

Fig. 9. Time series of an array of laser reflection points according to test profile 1-1 in an open area. Laser reflection points in red are from 06.07.2024, green – 17.07.2024, blue – 25.07.2024, and lilac – 05.08.2024

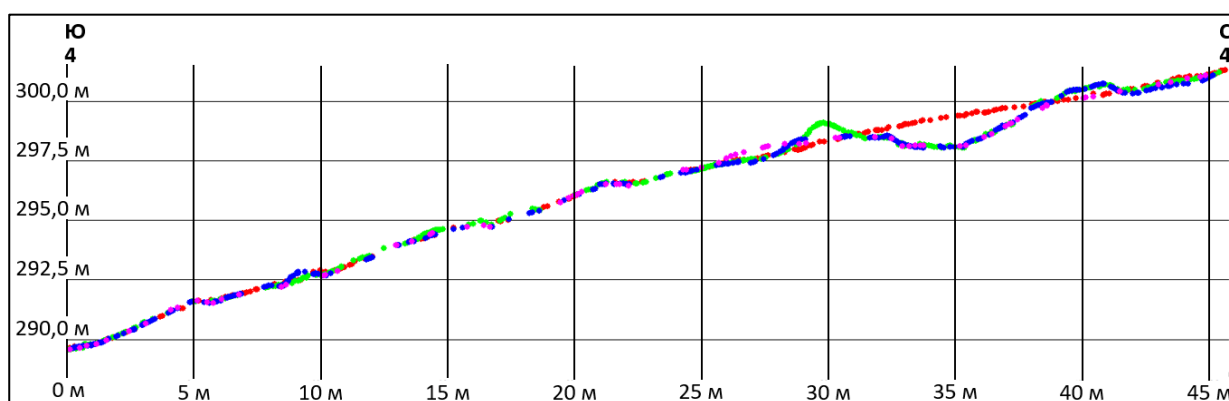


Рис. 10. Временной ряд массива ТЛО по проверочному профилю 4-4 на частично закрытой местности и стыке не измененной и измененной зон. ТЛО красного цвета – от 06.07.2024, зеленого – от 17.07.2024, синего – от 25.07.2024, сиреневого – от 05.08.2024

Fig. 10. Time series of the array of laser reflection points along the test profile 4-4 on a partially closed area and the junction between the unmodified and modified zones. Laser reflection points in red are from 06.07.2024, green – 17.07.2024, blue – 25.07.2024, and lilac – 05.08.2024

Режимные наблюдения с применением ВЛС проводились как по профилям № 1–18 предоставленными заказчиком, так и по всей территории сканирования с анализом изменений в рельефе при последующих сканированиях (рис. 11). Инструментальные наблюдения проводились вдоль автомобильной дороги по бордюрам и краю подпорной стенки (рис. 12). Также осуществлялся контроль состояния защитного сооружения – подпорной стенки и воздушным лазерным сканером [27].

Результаты

При сравнении построенных статических моделей ЦМР выстраиваются динамические модели. По динамическим моделям, построенным при математическом вычитании разновременных статических ЦМР, определяется совокупность вертикальных и горизонтальных изменений в рельефе (рис. 13). Для удобства интерпретации (получения численных

значений) вертикальные изменения можно получить как в виде профилей, так и в виде динамической модели. Горизонтальные перемещения удобнее фиксировать путём сравнения построенных изолиний разновременных моделей ЦМР учитывая погрешность сканирования. Ниже приведена графическая таблица (табл. 1) с примером интерпретации данных в точке режимных наблюдений, в которой при желании можно также разместить ДМ для контроля.

По статическим моделям также проводился контроль обратной засыпки углубления [30], которое спровоцировало оползневое явление, ЦМР от 06.07.2024 и от 17.07.2024 (рис. 14).

Расчеты засыпки углубления части котлована, приведшего к активизации оползневого процесса, показали, что бетона могло быть использовано порядка 223,58 м³, грунта «земляная отсыпка» – порядка 842,8 м³.

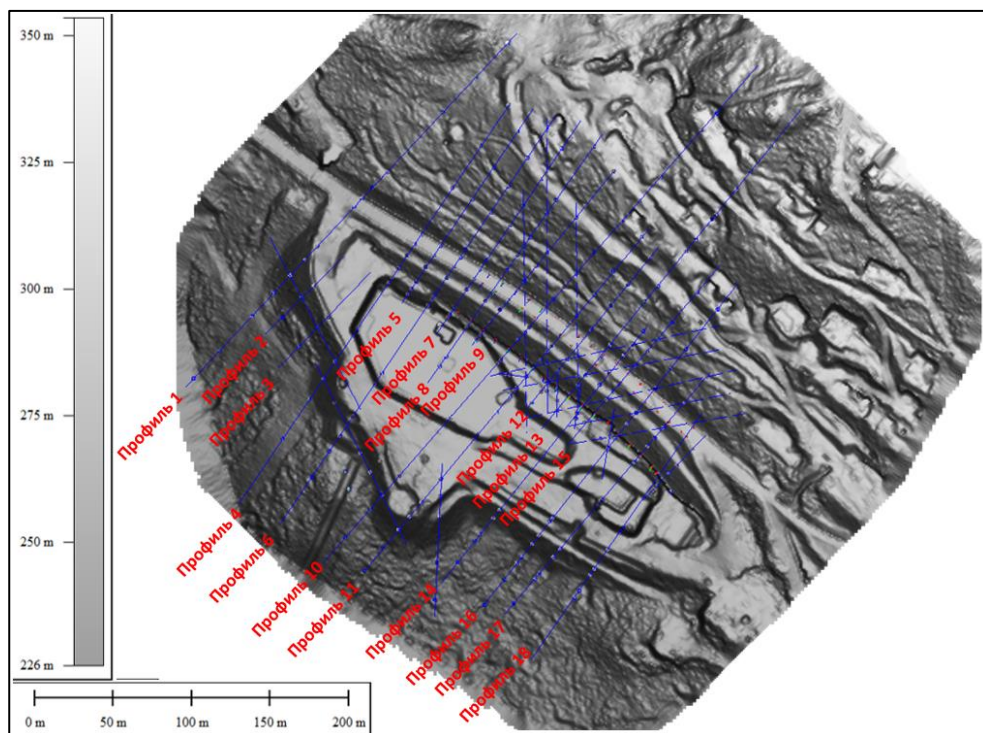


Рис. 11. ЦМР с профилями и точками режимных наблюдений. Синими линиями обозначены профили режимных наблюдений, синими кружками – точки режимных наблюдений, красными точки – инструментальных наблюдений

Fig. 11. Digital Elevation Model with profiles and points of regime observations. Blue lines indicate the profiles of regime observations, blue circles indicate the points of regime observations, red circles indicate the points of instrumental observations

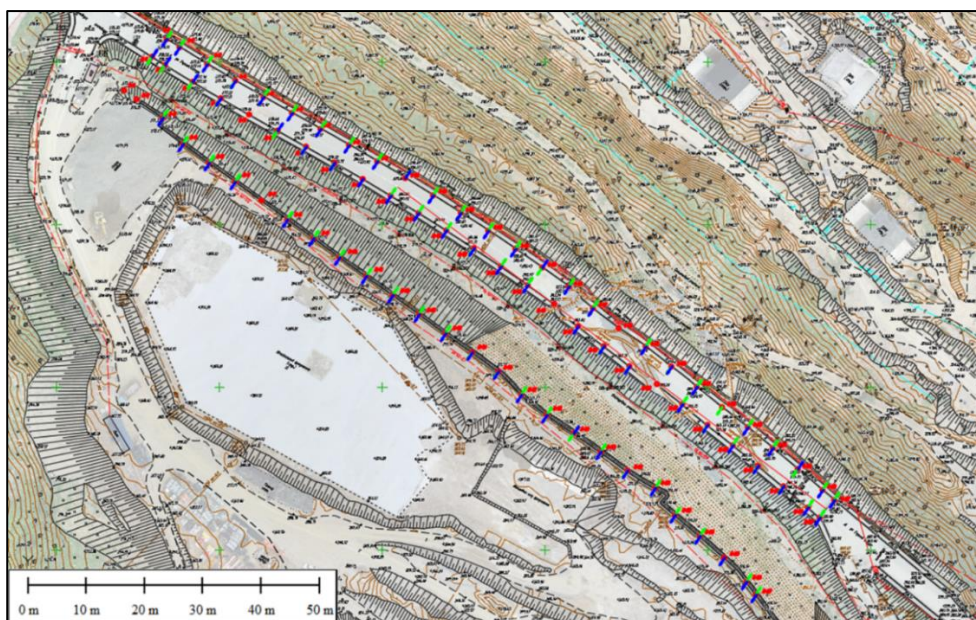
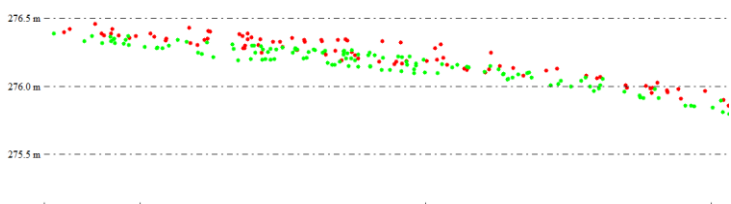
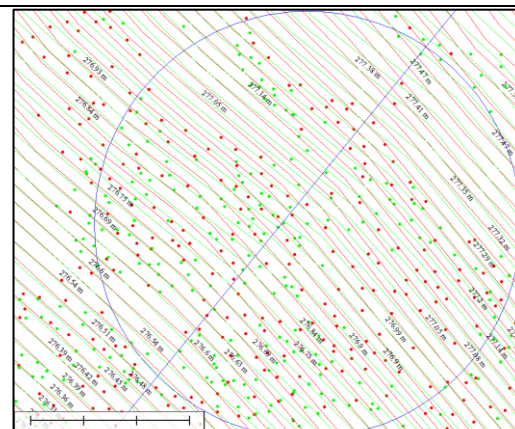
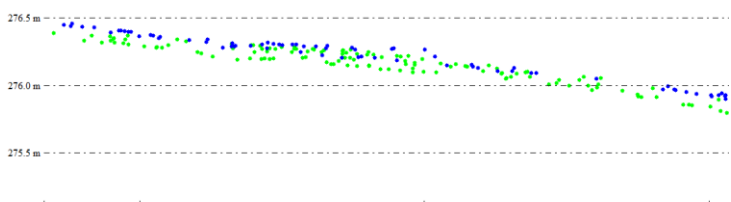
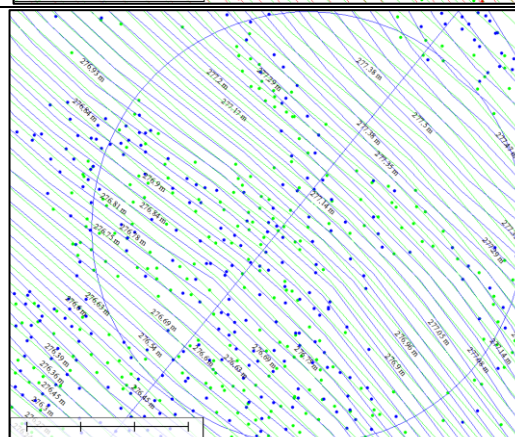
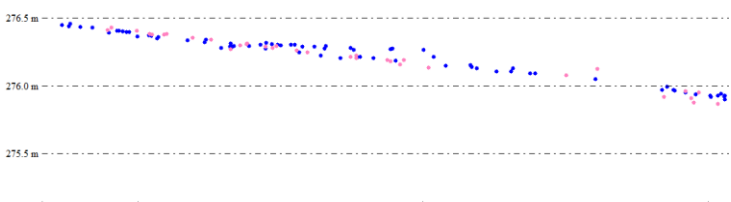
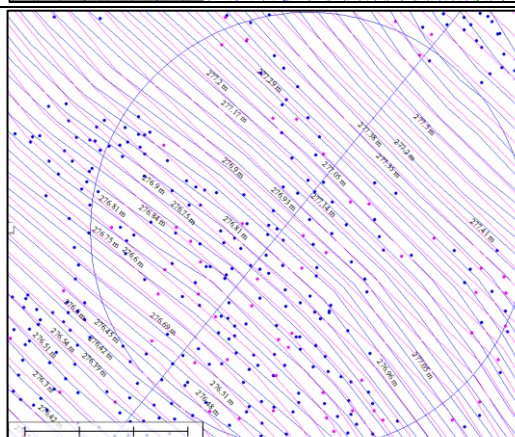


Рис. 12. Фрагмент топографического плана с точки инструментальных режимных наблюдений, обозначены кружками красного цвета с красными и зелеными стрелками смещения

Fig. 12. Fragment of a topographic plan from the point of instrumental regime observations, indicated by red circles with red and green offset arrows

Таблица 1. Пример интерпретации данных режимных наблюдений с использованием временных рядов статических моделей

Table 1. Example of interpretation of data of regime observations using time series of static models

From Pos: 1304548.175, 686061.003 			
Сравнение ТЛО, определение изменений по высоте: красным цветом ТЛО 06.07.2024, зеленым цветом ТЛО 17.07.2024. Сравнение изолиний, определение смещений в плане: красным цветом 06.07.2024, зеленым цветом 17.07.2024. Comparison of laser reflection points, determination of changes in height: laser reflection points 06.07.2024 in red, laser reflection points 17.07.2024 in green. Comparison of isolines, determination of displacements in plan: 06.07.2024 in red, 17.07.2024 in green.			
From Pos: 1304548.175, 686061.003 			
Сравнение ТЛО, определение изменений по высоте: зеленым цветом ТЛО 17.07.2024, синим цветом ТЛО 25.07.2024. Сравнение изолиний, определение смещений в плане: зеленым цветом 17.07.2024, синим цветом 25.07.2024. Comparison of laser reflection points, determination of changes in height: laser reflection points 17.07.2024 in green, laser reflection points 25.07.2024 in blue. Comparison of isolines, determination of displacements in plan: 17.07.2024 in green, 25.07.2024 in blue.			
From Pos: 1304548.175, 686061.003 			
Сравнение ТЛО, определение изменений по высоте: синим цветом ТЛО 25.07.2024, сиреневым цветом ТЛО 17.07.2024. Сравнение изолиний, определение смещений в плане: синим цветом 25.07.2024, сиреневым цветом 05.08.2024. Comparison of laser reflection points, determination of changes in height: blue color for laser reflection points 25.07.2024, lilac color for laser reflection points 17.07.2024. Comparison of isolines, determination of displacements in plan: blue color for 25.07.2024, lilac color for 05.08.2024.			
Дата съемки/Scan date		Точка 147/Point 147	
Суммарное перемещение с 06 по 17.07 Total movement from 06 to 17.07		ΔY, мм/mm	ΔZ, мм/mm
Суммарное перемещение с 17 по 25.07 Total movement from 17 to 25.07		+30	–60
Суммарное перемещение с 17 по 25.07 Total movement from 17 to 25.07		+10	–20
Суммарное перемещение с 25.07 по 05.08 Total movement from 25.07 to 05.08		0	0
Контроль 06.07–05.08/Control 06.07–05.08		+40	–80

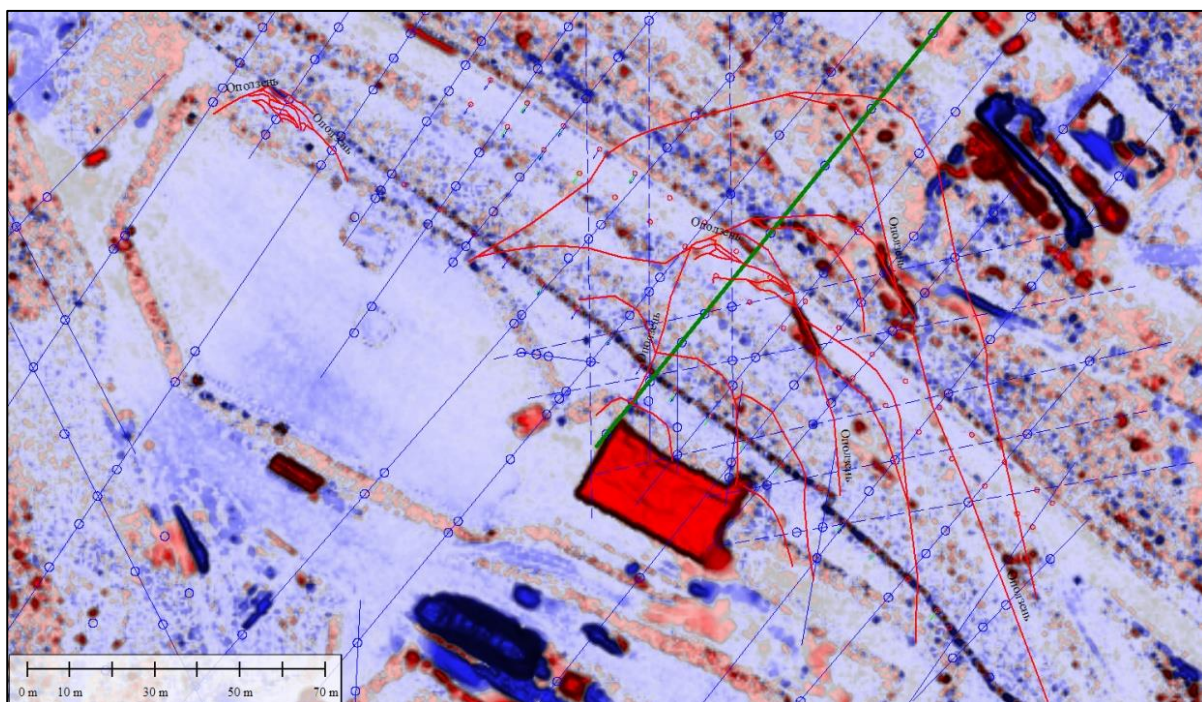


Рис. 13. Динамическая модель из 0-й и 3-й статических моделей. Серая (с оттенком синего – возможности цветопередачи шейдера в ПО) зона – нулевые изменения, синяя зона – отрицательные изменения, красная – положительные изменения

Fig. 13. Dynamic model from 0-th and 3-rd static models. Gray (with a shade of blue – color rendering capabilities of the shader in the software) zone is zero changes, blue zone is negative changes, red is positive changes



Рис. 14. ЦМР части котлована. Контроль обратной засыпки углубления, спровоцировавшего оползень. Голубой штриховкой обозначена бетонная заливка, коричневой – отсыпка грунтом

Fig. 14. Digital Elevation Model of a part of the excavation pit. Control of backfilling of the depression with the landslide trigger. Blue hatching indicates concrete filling, brown hatching indicates soil backfill

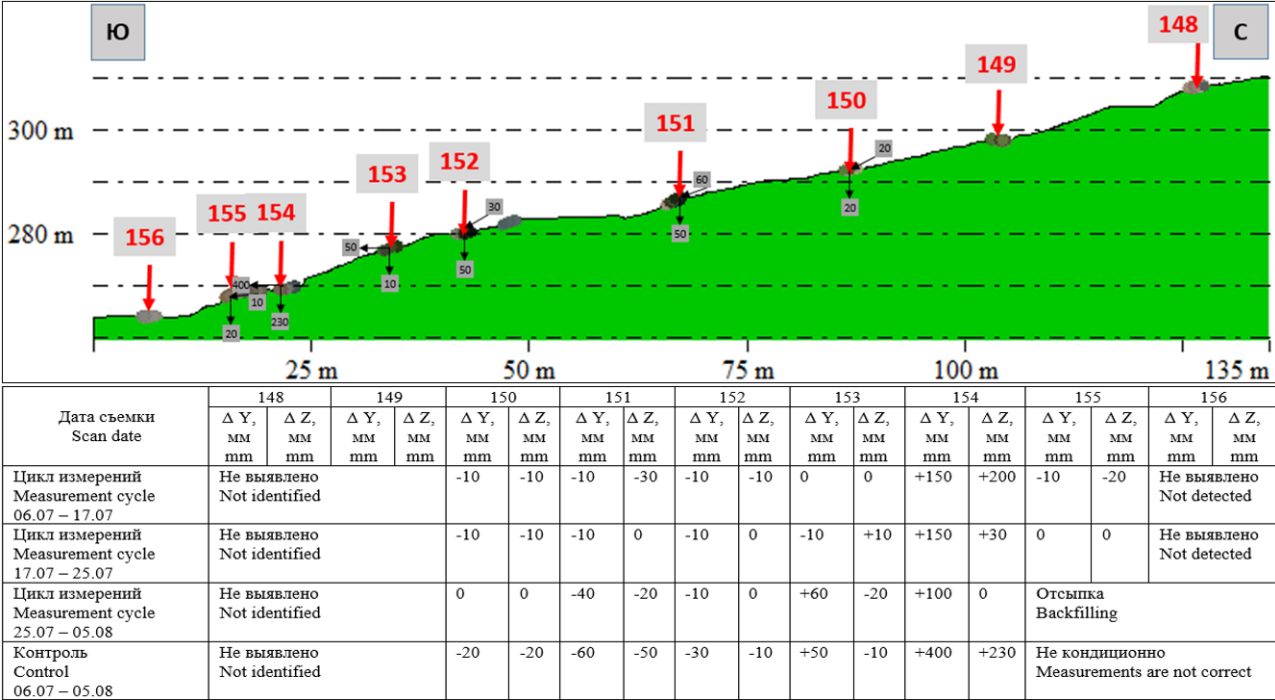


Рис. 15. Пример представления из ведомости режимных наблюдений по профилю 12-12 с таблицей интерпретации данных

Fig. 15. Example of a presentation from the list of regime observations for profile 12-12 with a data interpretation table

Графическое оформление ведомости выглядит следующим образом: профиль с точками режимных наблюдений и ведомость численных значений (рис. 15).

Оползень № 1, сформированный в северо-северо-западной части котлована, по данным мониторинга на основе данных ВЛС и космоснимка сверхвысокого разрешения находится в условно равновесном состоянии. На дату сканирования 25.07.2024 изменения в его микрорельефе не наблюдается. Габрионная стенка, выполняющая роль подпорной стены откоса автомобильной дороги, на дату сканирования 17.07.2024 не показывает изменений.

Оползень № 2, локализованный на склоновом участке выше уровня котлована, на даты исследования: 06.07.2024, 17.07.2024, 25.07.2024 и 05.08.2024, находится в стадии затухающего движения благодаря предпринятым противооползневые меры.

Анализ результатов двух последних ТЛО от 25.07.2024 и 05.08.2024 выявил дифференцированную кинематику смещения различных структурных элементов оползневого тела. В центральной части оползня и на втором уступе, характеризующемся формированием блоков с обширными трещинами зияния ниже уровня главного уступа, зафиксировано продолжающееся перемещение масс в субвертикальном направлении.

Пространственная дифференциация скоростей смещения проявляется в существенном снижении динамики краевых частей оползня относительно его центральной зоны. Данные ВЛС и космоснимка сверхвысокого разрешения по состоянию на 05.08.2024 не фиксируют смещений в периферийных участках оползневого тела.

Результаты инструментальных наблюдений в период с 06 по 25.07.2024 (табл. 2) подтверждают тенденцию к постепенному затуханию оползневых процессов на исследуемом участке.

Заключение

Воздушное лазерное сканирование особенно эффективно в сложных горных условиях и при большой протяженности объектов. Метод позволяет экономить время полевых работ, хотя увеличивает объем камеральной обработки. При этом обеспечивается высокая информативность данных для оценки геолого-геоморфологических условий с учетом рельефа.

Развитие технологии ВЛС на сегодняшний день при использовании дополнительных средств привязки и уравнивания массивов ТЛО позволяет достичь точности определения положения точки в пространстве (в зависимости от широты) 3 см, а повторное сканирование и уравнивание, и привязка массивов ТЛО позволяют получать данные с абсолютной погрешностью 3 см.

Таблица 2. Инструментальные наблюдения, бордюр с нагорной стороны

Table 2. Instrumental observations, border from the upland side

№ точки Point no.	отметка, м mark, m		dH, м (m)	отклонение, м (положительное значение в подгорную сторону) deviation, m (positive value in the downhill direction)	№ точки Point no.	отметка, м mark, m		dH, м (m)	отклонение, м (положительное значение в подгорную сторону) deviation, m (positive value in the downhill direction)	№ точки Point no.	отметка, м mark, m		dH, м (m)	отклонение, м (положительное значение в подгорную сторону) deviation, m (positive value in the downhill direction)
	06.07. 2024	17.07. 2024				17.07. 2024	25.07. 2024				06.07. 2024	25.07. 2024		
1-1	276,420	276,363	-0,057	-0,02	1-1	276,363	276,406	0,043	0,05	1-1	276,420	276,406	-0,014	0,03
1-2	276,694	276,694	0,000	-0,08	1-2	276,694	276,686	-0,008	0,07	1-2	276,694	276,686	-0,008	-0,01
1-3	277,437	277,432	-0,005	-0,02	1-3	277,432	277,416	-0,016	0,01	1-3	277,437	277,416	-0,021	-0,01
1-4	278,073	278,059	-0,014	0,04	1-4	278,059	278,028	-0,031	0,00	1-4	278,073	278,028	-0,045	0,04
1-5	278,654	278,646	-0,008	-0,04	1-5	278,646	278,626	-0,020	0,04	1-5	278,654	278,626	-0,028	0,00
1-6	279,182	279,196	0,014	-0,04	1-6	279,196	279,162	-0,034	0,04	1-6	279,182	279,162	-0,020	0,00
1-7	279,636	279,665	0,029	-0,05	1-7	279,665	279,655	-0,010	0,05	1-7	279,636	279,655	0,019	0,00
1-8	280,041	280,078	0,037	-0,03	1-8	280,078	280,079	0,001	0,01	1-8	280,041	280,079	0,038	-0,02
1-9	280,468	280,509	0,041	-0,02	1-9	280,509	280,465	-0,044	0,00	1-9	280,468	280,465	-0,003	-0,02
1-10	280,876	280,889	0,013	-0,02	1-10	280,889	280,835	-0,054	-0,01	1-10	280,876	280,835	-0,041	-0,03
1-11	281,208	281,268	0,060	-0,06	1-11	281,268	281,203	-0,065	0,06	1-11	281,208	281,203	-0,005	0,00
1-12	281,602	281,691	0,089	-0,06	1-12	281,691	281,606	-0,085	0,06	1-12	281,602	281,606	0,004	0,00
1-13	282,053	282,106	0,053	-0,06	1-13	282,106	282,041	-0,065	0,02	1-13	282,053	282,041	-0,012	-0,04
1-14	282,492	282,553	0,061	-0,04	1-14	282,553	282,476	-0,077	0,04	1-14	282,492	282,476	-0,016	0,00
1-15	282,956	282,969	0,013	0,02	1-15	282,969	282,918	-0,051	-0,03	1-15	282,956	282,918	-0,038	-0,01
1-16	283,379	283,419	0,040	-0,05	1-16	283,419	283,341	-0,078	0,07	1-16	283,379	283,341	-0,038	0,02
1-17	283,263	283,347	0,084	-0,08	1-17	283,347	283,269	-0,078	0,08	1-17	283,263	283,269	0,006	0,00
1-18	283,853	утерян/lost			1-18	утерян/lost			1-18	283,853	утерян/lost			
1-19	283,975	283,996	0,021	-0,04	1-19	283,996	283,916	-0,080	0,04	1-19	283,975	283,916	-0,059	0,00
1-20	284,393	284,413	0,020	0,02	1-20	284,413	284,307	-0,106	0,01	1-20	284,393	284,307	-0,086	0,03

Немаловажную роль играет расстановка опознавательных знаков, которые привязываются геодезическими методами, а также проведенный контроль качества сканирования максимально минимизирует накопительные погрешности. Представленные работы по мониторингу в очередной раз продемонстрировали эффективность не только режимных наблюдений лазерным сканером, но и контроля строительства (в конкретном случае обратная засылка углубления котлована, спровоцировавшего оползневые явления), прослеживание затухания

оползневого процесса после принятых мер. Также продемонстрированная методика мониторинга контролировалась и дублировалась классическими геодезическими наблюдениями. Дальнейшее развитие программно-аппаратного комплекса для позиционирования лазерных сканеров и другого оборудования может позволить достичь не сантиметровых, а миллиметровых точностей, что в перспективе, при уже разработанной методике, сможет заменить классические инструментальные наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Звонкова Т.В. Прикладная геоморфология. – М.: Высшая школа, 1970. – 140 с.
- Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. – СПб: Наука, 2001. – 407 с.
- Познанин В.Л. Пространственная дифференциация геологической среды – основа единой системы экзогенных геологических процессов // Планета Земля. – 2012. – № 3 (9). – С. 184–192.
- Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
- Симонов Ю.Г., Кружалин В.И. Инженерная геоморфология. – М.: МГУ, 1993. – 208 с.
- Бурцев А.А., Богуш И.А., Рябов Г.В. Теоретические начала инженерной геодинамики. Процессы и явления внутренней геодинамики. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2022. – 138 с.
- Смирнов Е.А., Кочнева Д.А. Оценка точности глобальной цифровой модели рельефа FABDEM для горных территорий (на примере Макажойской котловины, Чеченская Республика) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2024. – Т. 2. – № 9. – С. 74–78. DOI: 10.23885/2500-123X-2024-2-9-74-78 EDN: VSKLXX
- Сравнительная оценка воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов / Р.А. Друзь, А.В. Протасова, Ш.Р. Охунов, А.В. Кшановская // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 130–141. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_130 EDN: TBJGAV

9. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization / G. Rossi, L. Tanteri, V. Tofani, P. Vannocci, S. Moretti, N. Casagli // *Landslides*. – 2018. – Vol. 15. – P. 1045–1052. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>
10. UAV applications to assess short-term dynamics of slow-moving landslides under dense forest cover / V. Ilinca, I. Sandric, Z. Chitu, R. Irimia, I. Gheuca // *Landslides*. – 2022. – Vol. 19. – P. 1717–1734. DOI: [10.1007/s10346-022-01877-9](https://doi.org/10.1007/s10346-022-01877-9) EDN: IMANPP
11. Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. A Detailed survey and future directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with potential applications // *Aerospace*. – 2021. – Vol. 8. – Iss. 12. – article number 363. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8120363>
12. Бабoryкин М.Ю. Воздушное лазерное сканирование как один из методов аэрогеологии при проведении дешифрирования опасных геологических процессов и явлений // *Наука, технологии и жизнь* – 2016: III Международная научная конференция. Сборник статей. – Карловы Вары; М.: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2016. – С. 474–496. EDN XSVLJR
13. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk / J. Corominas, C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J.-P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi, K. Pitilakis, M.G. Winter, M. Pastor, S. Ferlisi, V. Tofani, J. Hervas, J.T. Smith // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2014. – Vol. 73. – P. 209–263. DOI: [10.1007/s10064-013-0538-8](https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8) EDN: JMSVXY
14. Бабoryкин М.Ю., Жидиляева Е.В. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // *Инженерные изыскания*. – 2014. – № 3. – С. 16–24. EDN: SJCTSN
15. Способ проведения геотехнического мониторинга линейных сооружений и площадных объектов на основе воздушного лазерного сканирования: пат. № 2655956 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/00, G01V 99/00; № 2017108882: заявл. 16.03.2017; опублик. 30.05.2018. EDN: NWPOJR
16. Бабoryкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // *Инженерные Изыскания*. – 2015. – № 2. – С. 30–36. EDN: TSMNSJ
17. Величко И.М. Сравнение лазерного сканирования и радарной интерферометрии при наблюдении за с движениями земной поверхности на открытых горных работах // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2025. – Т. 25. – № 3. – С. 10–15. DOI: [10.56195/20793332-2025-25-3-10-15](https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-10-15) EDN: JFNPBT
18. Erosion detection and monitoring in quick clay areas by repeat UAV-borne LiDAR surveys: two case studies from Norway / R. Frauenfelder, S.E. Salazar, E.M. Paulsen, E.H. Reutz, I.H. Steinholt, L. Rødvand, P. Paniagua, J.S. L'Heureux // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2025. – Vol. 1523. – article number 012039. DOI: [10.1088/1755-1315/1523/1/012039](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1523/1/012039)
19. Road condition monitoring with drones and LiDAR in infrastructure technology / A.R. Sugiarto, G.N. Abdi, I. Sadidan, M.R. Fitrianto, F. Ramadhani // *Semesta Teknika*. – 2025. – Vol. 28. – № 1. – P. 113–124. DOI: <https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25170>
20. UAV LiDAR-based 3D point cloud data processing for monitoring consolidation settlement during construction: a case study in Busan, South Korea / Seok-Jun Ko, Seongho Hong, Tae-Young Kwak, Kyo-Young Gu, Sung-Ryul Kim // *Environmental Earth Sciences*. – 2025. – Vol. 84. – article number 362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12247-8>
21. Ground subsidence monitoring in based on UAV-LiDAR technology: a case study of a mine in the Ordos, China / Shikai An, Liang Yuan, Ying Xu, Xiao Wang, Dawei Zhou // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2024. – Vol. 10. – article number 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00762-0>
22. Бабoryкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Дешифрирование материалов аэрокосмической съемки для анализа инженерно-геологических условий в общем алгоритме изысканий на линейных объектах // *Инженерные Изыскания*. – 2014. – № 9–10. – С. 13–21. EDN: TEGEUB
23. Бабoryкин М.Ю. Выстраивание практики и методики взаимодействия проектировщиков и изыскателей на примере объекта газификации юго-западных районов Краснодарского края // *Инженерные Изыскания*. – 2015. – № 7. – С. 40–43. EDN: UGCKXD
24. Способ дешифрирования экзогенных геологических процессов и инженерно-геологических условий: пат. № 2655955 С1 Российская Федерация, МПК G01V 99/00, G01C 11/00; опублик. 30.05.2018.
25. Оползни. Исследование и укрепление / под ред. Г.С. Золотарева, Р. Кризека, Р. Шустера. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
26. Соловьёв В.А. Соловьёва Л.П. Глобальная экология (экология геосфер земли). – Краснодар: Изд-во КубГУ, 2005. – 422 с.
27. Алтынцев М.А., Алтынцева М.А. Применение технологии лазерного сканирования для контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов // *Интеркарто. Интергис*. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 377–393. DOI: [10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393](https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393) EDN: NQWMBV
28. Липский М.И., Бебых С.Н. Контроль состояния земляного полотна железных дорог с помощью лазерных сканеров // *Специальная техника и технологии транспорта*. – 2024. – № 23. – С. 105–109. EDN: QBFAVW
29. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology // *Developments in Earth Surface Processes*. – 2020. – Vol. 23. – P. XIII–XV. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6>
30. A LiDAR-based backfill monitoring system / Xingliang Xu, Pengli Huang, Zhengxiang He, Ziyu Zhao, Lin Bi // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 24. – article number 12073. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142412073>
31. Баклагин В.Н. Построение математической модели котловины Онежского озера // *Инженерный вестник Дона*. – 2013. – № 3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-matematicheskoy-modeli-kotloviny-onezhskogo-ozera> (дата обращения: 21.05.2025).
32. Бабoryкин М.Ю., Бурцев А.А. Концепция проведения мониторинга опасных геологических процессов и явлений на основе воздушного лазерного сканирования // *Наука и Мир*. – 2017. – № 9 (49). – С. 78–84. EDN: DAFHQV
33. Свод правил СП 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования». URL: <https://base.garant.ru/72239308/?ysclid=meh3eqqab9500548472> (дата обращения: 21.05.2025).

Информация об авторах

Максим Юрьевич Баборыкин, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог, ООО «Аэрогеоматика», Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Фрунзе, 22/1; baborykin.my@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8203-2755>

Поступила в редакцию: 12.06.2025

Поступила после рецензирования: 29.08.2025

Принята к публикации: 27.09.2025

REFERENCES

1. Zvonkova T.V. *Applied geomorphology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 140 p. (In Russ.)
2. Ivanov I.P., Trzhtsinsky Yu.B. *Engineering geodynamics*. St Petersburg, Nauka Publ., 2001. 407 p. (In Russ.)
3. Poznanin V.L. Spatial differentiation of the geological environment – the basis of a unified system of exogenous geological processes. *Planet Earth*, 2012, no. 3 (9), pp. 184–192. (In Russ.)
4. Ris U.G. *Fundamentals of remote sensing*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 336 p. (In Russ.)
5. Simonov Yu.G., Kruzhalin V.I. *Engineering geomorphology*. Moscow, Moscow State University Publ., 1993. 208 p. (In Russ.)
6. Burtsev A.A., Bogush I.A., Ryabov G.V. *Theoretical principles of engineering geodynamics. Processes and phenomena of internal geodynamics*. Novocherkassk, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov Publ., 2022. 138 p. (In Russ.)
7. Smirnov E.A., Kochneva D.A. Accuracy assessment of the global FABDEM digital elevation model for mountainous areas (using the example of the Makazhoy basin, Chechen republic). *Ecology economy informatics. Geoinformation technologies and space monitoring*, 2024, vol. 2, no. 9, pp. 74–78. (In Russ.) DOI: 10.23885/2500-123X-2024-2-9-74-78 EDN: VSKLXX
8. Druz R.A., Protasova A.V., Okhunov Sh.R., Kshanovskaya A.V. Comparison of airborne laser scanning and aerial survey using unmanned air vehicles. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2023, no. 5, pp. 130–141. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_130 EDN: TBJGAV
9. Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*, 2018, vol. 15, pp. 1045–1052. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>
10. Ilinca V., Sandric I., Chitu Z., Irimia R., Gheuca I. UAV applications to assess short-term dynamics of slow-moving landslides under dense forest cover. *Landslides*, 2022, vol. 19, pp. 1717–1734. DOI: 10.1007/s10346-022-01877-9 EDN: IMANPP
11. Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. A detailed survey and future directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with potential applications. *Aerospace*, 2021, vol. 8, Iss. 12, article number 363. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8120363>
12. Baborykin M.Yu. Airborne laser scanning as one of the methods of aerogeology in the interpretation of hazardous geological processes and phenomena. *Collection of articles. III International Scientific Conference. Science, technology and life – 2016*. Karlovy Vary – Moscow, International Center for Research Projects, 2016. pp. 474–496. (In Russ.) EDN: XSVLJR
13. Corominas J., Van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J.-P., Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervás J., Smith J.T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, vol. 73, pp. 209–263. DOI: 10.1007/s10064-013-0538-8 EDN: JMSVXY
14. Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V. Landslide monitoring using laser scanning and geodetic observations. *Engineering surveys*, 2014, no. 3, pp. 16–24. (In Russ.) EDN: SJCTSN
15. Baborykin M.Yu. *Method for conducting geotechnical monitoring of linear structures and area objects based on airborne laser scanning*. Patent RF no. 2017108882, 2018. (In Russ.) EDN: NWPOJR
16. Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Revealing hazardous geological processes for engineering-geological surveys on the basis of digital terrain models. *Engineering Surveys*, 2015, no. 2, pp. 30–36. (In Russ.) EDN: TSMNSJ
17. Velichko I.M. Comparison of laser scanning and radar interferometry in observing the movements of the earth's surface in open-pit mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 10–15. (In Russ.) DOI: 10.56195/20793332-2025-25-3-10-15 EDN: JFNPBT
18. Frauenfelder R., Salazar S.E., Paulsen E.M., Reutz E.H., Steinholt I.H., Rødvand L., Paniagua P., L'Heureux J.S. Erosion detection and monitoring in quick clay areas by repeat UAV-borne LiDAR surveys: two case studies from Norway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, vol. 1523, article number 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/1523/1/012039
19. Sugiarto A.R., Abdi G.N., Sadidan I., Fitrianto M.R., Ramadhani F. Road condition monitoring with drones and LiDAR in infrastructure technology. *Semesta Teknika*, 2025, vol. 28, no. 1, pp. 113–124. DOI: <https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25170>
20. Seok-Jun Ko, Seongho Hong, Tae-Young Kwak, Kyo-Young Gu, Sung-Ryul Kim. UAV LiDAR-based 3D point cloud data processing for monitoring consolidation settlement during construction: a case study in Busan, South Korea. *Environmental Earth Sciences*, 2025, vol. 84, article number 362. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12247-8>
21. Shikai An, Liang Yuan, Ying Xu, Xiao Wang, Dawei Zhou. Ground subsidence monitoring in based on UAV-LiDAR technology: a case study of a mine in the Ordos, China. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2024, vol. 10, article number 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00762-0>
22. Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Interpretation of aerospace materials to determine engineering-geological conditions in the general algorithm of surveys at linear objects. *Engineering Surveys*, 2014, no. 9–10, pp. 13–21. (In Russ.) EDN: TEGEUB
23. Baborykin M.Yu. Forming the practice and technique of interaction between designers and engineering surveyors by the example of a gasification object in the southwest regions of the Krasnodarskiy kray. *Engineering Surveys*, 2015, no. 7, pp. 40–43. (In Russ.) EDN: UGCKXD

24. Baborykin M.Yu. *Method for deciphering exogenous geological processes and engineering-geological conditions*. Patent RF no. 2655955, 2018. (In Russ.)
25. *Landslides. Research and strengthening*. Eds. G.S. Zolotarev, R. Krizek, R. Shuster. Moscow, Mir Publ., 1981. 368 p. (In Russ.)
26. Solovyov V.A. Solovyova L.P. *Global ecology (ecology of the earth's geospheres)*. Krasnodar, KubSU Publ., 2005. 422 p. (In Russ.)
27. Altyntsev M.A., Altyntseva M.A. Application of laser scanning technology to control the state of protective constructions when transferring oil products. *InterCarto. InterGIS*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 377–393. (In Russ.) DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-377-393 EDN: NQWMBV
28. Lipskiy M.I., Bebykh S.N. Monitoring the condition of the railway roadbed using laser scanners. *Special equipment and transport technologies*, 2024, no. 23, pp. 105–109. (In Russ.) EDN: QBFAWV
29. Tarolli P., Mudd S.M. Introduction to remote sensing of geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 2020, vol. 23, pp. XIII–XV. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6>
30. Xingliang Xu, Pengli Huang, Zhengxiang He, Ziyu Zhao, Lin Bi. A LiDAR-based backfill monitoring system. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, Iss. 24, article number 12073. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142412073>
31. Baklagin V.N. Construction of a mathematical model of the Onega Lake basin. *Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 3. (In Russ.) Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-matematicheskoy-modeli-kotloviny-onezhskogo-ozera> (accessed: 21 May 2025).
32. Baborykin M.Yu., Burtsev A.A. Concept of monitoring hazardous geological processes and phenomena based on airborne laser scanning. *Science and the World*, 2017, no. 9 (49), pp. 78–84. (In Russ.) EDN: DAFHQV
33. Code of Practice SP 420.1325800.2018 "Engineering Surveys for Construction in Areas of Landslide Development. General Requirements". (In Russ.) Available at: <https://base.garant.ru/72239308/?ysclid=meh3eqqab9500548472> (accessed: 21 May 2025).

Information about the author

Maksim Yu. Baborykin, Cand. Sc., Chief Geologist, Aerogeomatika LLC, 22/1, Frunze street, Krasnodar, 350063, Russian Federation. baborykin.my@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8203-2755>

Received: 12.06.2025

Revised: 29.08.2025

Accepted: 27.09.2025