

УДК 528.7:528.8:504.03:624.131.1  
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355

## Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте

<sup>1</sup> Долгополов Д.В., <sup>2</sup> Мелкий В.А., <sup>3</sup> Баборыкин М.Ю.

<sup>1</sup> ЗАО «Ай Ко»,

Россия, 109004, г. Москва, Большой Дровяной пер., 8 стр. 1

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,

Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

<sup>3</sup> АНО ВО «Университет Иннополис»,

Россия, 420500, Респ. Татарстан, г. Иннополис, ул. Университетская,

E-mail: d-daniil@yandex.ru; vamelkiy@mail.ru; baborykin.my@yandex.ru

**Аннотация.** В настоящее время использование средств дистанционных исследований территорий получает все большее распространение, особенно в связи с развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и технологии воздушного лазерного сканирования (ВЛС). Доступность и эффективность технологий аэрокосмических исследований позволяет использовать их во многих направлениях деятельности компаний, занимающихся транспортировкой газа или нефтепродуктов. Это и информационное обеспечение промышленной и экологической безопасности, задачи безопасности и охраны объектов трубопроводного транспорта, а также задачи, связанные с геотехническим мониторингом природно-технической среды трубопроводных систем. Такие исследования особенно важны в случаях, когда трубопровод проходит в сложных природно-климатических условиях. Мониторинг текущего состояния трубопровода и контроль динамики опасных геологических процессов (ОГП) – наиболее важные задачи геотехнического мониторинга. Сразу после завершения строительства с началом эксплуатации трубопроводная система оказывает существенное влияние на динамику природных процессов в коридоре трассы, в свою очередь и природные процессы оказывают свое влияние на трубопроводы. Поэтому при организации мониторинга необходимо руководствоваться принципом системности: учитывать все изменения взаимодействующих и изменяющихся во времени компонентов природно-технической среды трубопроводного транспорта. Комплекс разнородных средств наблюдений, собирающий данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используют для информационного обеспечения решения задач трубопроводного транспорта, которое при необходимости дополняется полевыми геодезическими изысканиями. При выборе комплекса технических средств руководствуются принципом разумной достаточности: выбирают технологии таким образом, чтобы затраты на изыскания были минимальными для обеспечения соответствия требованиям к результатам работ. В статье рассматриваются возможности использования технологий дистанционного зондирования для дополнения результатов классических геодезических измерений при геотехническом мониторинге трубопроводов, проходящих по территориям со сложными природно-климатическими условиями. Рассмотрены нормативные требования к производству работ по геотехническому мониторингу и предложены технические решения по информационному обеспечению данными ДЗЗ с необходимой точностью.

**Ключевые слова:** трубопровод, беспилотные летательные аппараты, воздушное лазерное сканирование, космическая съемка, аэрофотосъемка, точность измерений, опасные природные процессы

**Для цитирования:** Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Баборыкин М.Ю. 2022. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте. Региональные геосистемы, 46(3): 339–355. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355



# The Use of Earth Remote Sensing Technologies to Provide Geotechnical Monitoring and Mapping in Pipeline Transport

<sup>1</sup> Daniil V. Dolgoplov, <sup>2</sup> Vyacheslav A. Melkiy, <sup>3</sup> Maxim Yu. Baborykin

<sup>1</sup> CJSC "Ai Co"

8 p. 1 Bolshoy Drovyanoy lane, Moscow 109004, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

<sup>3</sup> Autonomous Non-profit Organization "University of Innopolis",

1 Universitetskaya St, Innopolis, Kazan 420500, Russia

E-mail: d-daniil@yandex.ru; vamelkiy@mail.ru; baborykin.my@yandex.ru

**Abstract.** The means of remote sensing of the Earth are being used more and more often for research of territories, especially, in connection with the development of unmanned aerial vehicles (UAV) and aerial laser scanning (ALS) technology, at the present time. Aerospace research technologies have such qualities as accessibility and efficiency, which allows them to be used in many areas of activity of companies, engaged in the transportation of gas or petroleum products. Technologies of remote sensing of the Earth are used for information support of industrial and environmental safety, solving problems of safety and protection of pipeline transport facilities, as well as tasks related to geotechnical monitoring of the natural and technical environment of pipeline systems. Such researches play particularly important role in cases when the pipeline passes under difficult natural and climatic conditions. Monitoring the current state of the pipeline and monitoring the dynamics of hazardous geological processes are the most significant tasks of geotechnical monitoring. The system has a significant impact on the dynamics of natural processes in the corridor of the route immediately after completion of construction, at the initial stage of operation of the pipeline; in its turn, natural processes have their effect on pipelines. Therefore, when organizing monitoring, it is necessary to be guided by the principle of consistency: to take into account all changes, interacting and time-varying components of the natural and technical environment of pipeline transport. A complex of heterogeneous means of observation, collecting data of remote sensing of the Earth, is used for information support of solving problems of pipeline transport, which, if necessary, is supplemented by field geodetic surveys. When choosing a set of technical means, they are guided by the principle of reasonable sufficiency: they choose technologies in such a way that the costs of research are minimal to ensure compliance with the requirements for the results of work. The possibilities of using remote sensing technologies to supplement the results of classical geodetic measurements during geotechnical monitoring of pipelines passing through territories with difficult natural and climatic conditions are discussed in the article. Regulatory requirements for the production of geotechnical monitoring works have been defined; technical solutions for the information provision of remote sensing data with the necessary accuracy have been proposed.

**Keywords:** pipeline, unmanned aerial vehicles, aerial laser scanning, satellite photography, aerial photography, measurement accuracy, dangerous natural processes

**For citation:** Dolgoplov D.V., Melkiy V.A., Baborykin M.Yu. 2022. The Use of Earth Remote Sensing Technologies to Provide Geotechnical Monitoring and Mapping in Pipeline Transport. Regional Geosystems, 46(3): 339–355 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355

---

## Введение

Выявление значительных изменений напряженно-деформированного состояния протяженных линейных сооружений возможно путем инструментальных измерений или анализа высокоточной аэрокосмической информации, которые используются при выполнении системного мониторинга технического состояния сооружений (геотехнического мониторинга). Среди линейных сооружений особое место занимают трубопроводные системы. При строительстве и эксплуатации трубопроводных магистралей оказывается су-

щественное воздействие на окружающую среду: нарушение почвенного покрова, разогрев грунтов от поверхности трубы при перекачке углеводородов, давление при деформациях линейного расширения или изгиба. Трубопроводы в свою очередь подвергаются негативному влиянию неблагоприятных процессов, как литосферных, так и гидрометеорологических. Геолого-геоморфологическим исследованиям рельефообразующих процессов, гидрологическим наблюдениям, анализу метеорологических явлений и изменений климатических условий уделяется большое внимание при инженерных изысканиях, а также при проведении геотехнического мониторинга [Зяцькова, 2004; Dekavalla, 2019; Мячина и др., 2020; Metternicht et al., 2020; Singhroy, 2020; Tarolli, Mudd, 2020; Yermolaev et al., 2021].

Геоинформационные технологии дают возможность использовать интегрированные информационные системы при организации комплексного геотехнического мониторинга, позволяющего вести наблюдение, осуществлять сбор информации, обработку и визуализацию данных, производить обобщение и выявление трендов протекающих процессов для прогноза их динамики и принятия управленческих решений [Цветков, 2012]. Развитие съемочных технологий с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и воздушного лазерного сканирования (ВЛС) позволяет создать трехмерные модели, обеспечивает доступность и эффективность мониторинга и высокоточного картографирования протяженных линейных объектов (рис. 1). Геоданные систематизируются на основе пространственно-временной информации [Craglia et al., 2017; Galton, 2017; Савиных, 2018; Guo, 2018; Di Maio et al., 2018; Guan et al., 2020]. Представление знаний в рамках искусственного интеллекта используется в символической форме, чтобы их можно было хранить и обрабатывать на компьютере. Пространственно-временные данные, предназначенные для выявления небольших деформаций при геотехническом мониторинге, должны обеспечиваться высокоточными измерениями [Аврунев и др., 2020]. Необходимая точность измерений определяется соответствующими производственными задачами. В статье приводится описание методов геотехнического мониторинга систем трубопроводного транспорта и требований к их проведению, как содержащихся в нормативных документах, так и научно обоснованных в процессе проведенного исследования.



Рис. 1. Трехмерная цифровая модель, построенная по данным ВЛС и космического снимка  
Fig. 1. Three-dimensional digital model built according to ALS data and a satellite image



### Объекты и методы исследования

При организации аэрокосмических исследований необходимо проанализировать производственные задачи, требования нормативной документации и с учетом этих требований подобрать технологию проведения работ, которая обеспечит необходимый результат с минимальными затратами.

В настоящем исследовании мы рассмотрели несколько наиболее распространенных производственных задач, возникающих в процессе геотехнического мониторинга трубопроводных систем и которые могут быть эффективно решены с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли [Маркелов, Цветков, 2015]. В качестве материала для исследования использовались нормативные документы [ГОСТ 31385–2016; РД 03-606-03; РД-23.040.00-КТН-0034-20; СП 365.1325800.2017; СП 22.13330; СП 305.1325800; СП 25.13330; ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02], публикации из открытых источников [Карпик и др., 2014; Аникаева, Мартюшев, 2020; Долгополов, 2020; Долгополов и др., 2019; 2020; 2021; 2022], а также результаты исследований природно-технической среды трубопровода, полученные различными средствами при мониторинге магистрального трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» [Баборыкин, 2017; Аврунев и др., 2020].

Для обоснования необходимой точности измерений при использовании технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте анализировались материалы аэрофотосъемки (АФС) с беспилотных летательных аппаратов, которые при помощи методов фотограмметрической обработки использовались для получения трехмерных цифровых моделей в едином информационном пространстве отраслевой ГИС. Данные цифровой аэрофотосъемки были дополнены данными воздушного лазерного сканирования, для получения более точной цифровой модели местности, кроме того, проведено ее сравнение с проектными данными.

### Результаты и их обсуждение

В существующей нормативной документации не всегда рекомендуется использование средств аэромониторинга. Вместе с тем уровень технических средств, их доступность и разработанное программное обеспечение позволяет успешно решать задачи мониторинга именно с использованием средств дистанционного зондирования, дополняя и, в какой-то части, замещая классические геодезические методы измерений.

Для существенной части задач мониторинга объектов, занимающих большое пространство (см. рис. 1), предпочтительными являются данные космической съемки, а для протяженных объектов – АФС, в том числе с использованием БПЛА [Yang et al., 2017; Rossi et al., 2018; Мажитова и др., 2020; Elmeseiry et al., 2021; Hodgson, Piovan, 2021]. Помимо этого, следует отметить большие перспективы применения технологий ВЛС [Долгополов, 2021], эффективность которых будет возрастать с развитием средств автоматизированной обработки материалов сканирования территорий.

Рассматривая задачи, которые решаются с помощью геотехнического мониторинга, можно выделить следующие основные виды работ:

- мониторинг состояния объектов инфраструктуры (трубопроводов и резервуаров);
- мониторинг процессов строительства и реконструкции;
- выявление и мониторинг ОГП в коридоре трассы;
- мониторинг береговых участков подводных переходов магистральных трубопроводов;
- построение карт смещений земной поверхности средствами радарной интерферометрии.

Технологии дистанционного зондирования в задачах геотехнического мониторинга приходят на смену классическим методам и должны обеспечивать решение производственных задач (табл. 1). А нормативная документация (ГОСТ, РД, СП и др.), используемая на предприятиях, требует доработки в соответствии с новыми научно обоснованными методами исследования.

Таблица 1  
Table 1

Применение технологий дистанционного зондирования для решения задач  
геотехнического мониторинга магистральных нефтепроводов  
Application of remote sensing technologies for solving problems of geotechnical monitoring  
of oil trunk pipelines

| Задачи мониторинга  | Нормативный документ  | Требования к точности  | Ширина съемки  | Периодичность  | Методы наблюдения   |
|---|---|--|--|--|---|
| 1   | 2   | 3  | 4  | 5  | 6   |
| Мониторинг состояния (деформации) трубопроводов   | РД-23.040.00-КТН-0034-20;<br>РД-17.020.00-КТН-129-18  | 5 мм *L (2 мм*L), где L – расстояние до реперного пункта в км                            | Вдоль трассы в зонах со сложными геологическими условиями  | не реже 1 раза в год   | ВЛС с использованием устройств определения высоты (УОВ), при подземной прокладке трассы в комплексе с высокоточными геодезическими методами контроля положения марок на объектах инфраструктуры и НЛС |
| Мониторинг состояния (деформации) резервуаров   | ГОСТ 31385-2016;<br>СП 365.1325800.2017;<br>РД 03-606-2003  | До 5 мм  | Резервуарные парки   | 1–2 раза в год   | Наземное лазерное сканирование  |
| Регулярный мониторинг строительных и ремонтных работ  | СП 305.1325800;<br>СП 22.13330;<br>СП 25.13330  | До 5 см  | На территорию строительства  | Регулярный мониторинг не реже 1 раза в месяц                       | Цифровая АФС и методы фотограмметрической обработки в комплексе с геодезическими методами или ВЛС совместно с цифровой АФС в комплексе с геодезическими методами                                      |
| Выявление и мониторинг ОПП: эрозия, карст, оползневые и осыпные склоновые процессы, суффозия, солифлюкция и др. Картографирование в масштабе 1: 500 | РД-23.040.00-КТН-0034-20;<br>РД-91.200.00-КТН-005-15;<br>ГКИНП-02-033-82<br>Инструкция по топографической съемке в масштабах 1: 5 000, 1: 2 000, 1:1 000 и 1: 500 | Средние погрешности положения объектов дешифрирования 0,75 мм в масштабе плана или 40 см | Ширина полосы съемки и камеральной обработки данных ВЛС не менее 150 м (75 м вправо и влево от оси трубопровода) | На участках линейной части трубопровода с ММГ и ЭГП – 1 раз в год. | ВЛС совместно с цифровой АФС. Для масштаба 1: 500 характеристики съемки: разрешение фотоснимков на местности от 5–7 см; плотность точек лазерного отражения от 5–9 точек на м <sup>2</sup>            |



Окончание табл. 1

| 1   | 2  | 3   | 4  | 5   | 6   |
|---|--|---|--|---|---|
| Выявление и мониторинг ОГП: эрозия, карст, оползневые и осыпные склоновые процессы, суффозия, солифлюкция и др. Картографирование в масштабе 1: 1 000, 1:2000 | РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-23.040.00-КТН-124-20; ГКИНП-02-033-82 | Средние погрешности положения объектов 0,75 мм в масштабе карты, что составляет 75 см для М 1:1000 и 1,5 м для М 1:2000 | Коридор трассы МТ в зоне сложных природно-климатических условий                          | 1–2 раза в год                                    | ВЛС совместно с цифровой АФС. Для М 1: 1000: разрешение фотоснимков на местности от 7–10 см; плотность точек лазерного отражения от 3–5 точек на м <sup>2</sup> . Для М 1: 2000: разрешение – от 10–15 см; плотность точек лазерного отражения от 2–3 точек на м <sup>2</sup> |
| Картографирование крупных проявлений ОГП в масштабах: 1: 5 000 и 1: 10 000  | РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-23.040.00-КТН-124-20                  | Средние погрешности 0,75 мм в масштабе карты, что составляет 3,75 м для М 1:5000 и 7,5 м для М 1:10 000                 | Коридор трассы магистрального нефтепровода в зоне сложных природно-климатических условий | 1–2 раза в год                                    | Геопривязанные космические снимки с разрешением 50 см и/или материалы аэросъемки с разрешением снимков 20 см. Погрешности положения точки для АФС в М 1: 5 000 и 1: 10 000 составляют 0,4 мм на карте, что соответствует 2 и 4 м на местности                                 |
| Мониторинг береговых участков подводных переходов магистральных нефтепроводов   | ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02                                     | 20 см и лучше   | Участок подводного перехода магистрального нефтепровода через водную преграду            | 1 раз в квартал и после паводка                   | Цифровая АФС участков подводных переходов магистрального нефтепровода через водную преграду или ВЛС, совмещенное с цифровой АФС   |
| Построение карт смещений земной поверхности и объектов инфраструктуры   | –  | До 2 см   | Территория мониторинга   | 4 раза в год (данные обновляются по сезонам года) | Методика мониторинга смещения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки с использованием в качестве постоянных отражателей инфраструктуры трубопроводов. Точность определения смещений 2–4 мм – первые см  |

Примечание: при составлении таблицы использовались данные ГОСТ, РД, СП [ГКИНП-02-033-82; ГОСТ 31385–2016; РД 03-606-03; РД-17.020.00-КТН-129-18; РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-23.040.00-КТН-124-20; СП 365.1325800.2017; СП 22.13330; СП 305.1325800; СП 25.13330; ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02]

Мониторинг состояния трубопроводов и резервуаров – ключевая задача геотехнического мониторинга. Для предприятий транспорта нефти и нефтепродуктов разработан РД-23.040.00-КТН-0034-20, устанавливающий нормативные показатели для мероприятий геотехнического мониторинга на магистральных трубопроводах, обеспечивающих транспорт нефти и нефтепродуктов [РД-23.040.00-КТН-0034-20]. Проводятся такие работы в соответствии с разработанными требованиями вдоль трассы в зонах со сложными геологическими условиями не реже 1 раза в год [РД-17.020.00-КТН-129-18]. При производстве работ на трассах с подземной прокладкой используется ВЛС с применением устройств определения высоты (УОВ) [Баборыкин, 2017]. ВЛС обычно выполняется в комплексе с высокоточными геодезическими методами, используемыми для контроля положения марок на объектах инфраструктуры, и наземным лазерным сканированием (НЛС) [ГОСТ 31385-2016; СП 365.1325800.2017; РД 03-606-2003].

Для обеспечения точности наблюдений, рекомендуется развивать сети референционных станций [Карпик и др., 2014]. Средние квадратические ошибки измерений объектов инфраструктуры должны быть не хуже точности нивелирования III класса и II класса для точек заземления трубопровода, что соответствует  $5 \text{ мм} \times L$  ( $2 \text{ мм} \times L$ ), где  $L$  – расстояние до реперного пункта в км. Мониторинг деформаций резервуаров производится 1–2 раза в год методом НЛС на всей территории резервуарных парков. В соответствии с требованиями нормативных документов точность измерений не должна превышать 5 мм [СП 365.1325800.2017].

Мониторинг строительных и ремонтных работ осуществляется регулярно не реже 1 раза в месяц с целью контроля результатов работ, сопоставления фактического выполнения с проектными решениями [СП 305.1325800; СП 22.13330; СП 25.13330]. Для съемки территории строительства используют комплексы на базе БПЛА, а затем применяют методы фотограмметрической обработки материалов съемки для получения трехмерных цифровых моделей и их сравнения с проектными данными в едином информационном пространстве отраслевых ГИС [Долгополов, 2020]. Цифровая АФС может быть проведена в комплексе с ВЛС для получения более точной цифровой модели местности (рис. 2, 3) [Антипов и др., 2012]. Цифровая АФС в комплексе с геодезическими методами и фотограмметрической обработкой [Аврунев и др., 2020; Долгополов, 2020] или ВЛС совместно с цифровой АФС в комплексе с геодезическими методами на всей территории строительных работ позволяют получить высокоточные модели местности.

Технологии выявления и мониторинга ОГП ранее уже были описаны рядом авторов [Tziavou et al., 2018; Долгополов и др., 2021; Карпик и др., 2021]. При картографировании крупных проявлений ОГП в более мелких масштабах (1: 5 000 и 1: 10 000) допустимо использовать ортофотопланы, полученные по результатам аэро-съемки или космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения (0,5 м) [РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-23.040.00-КТН-124-20; ГКИНП-02-033-82].



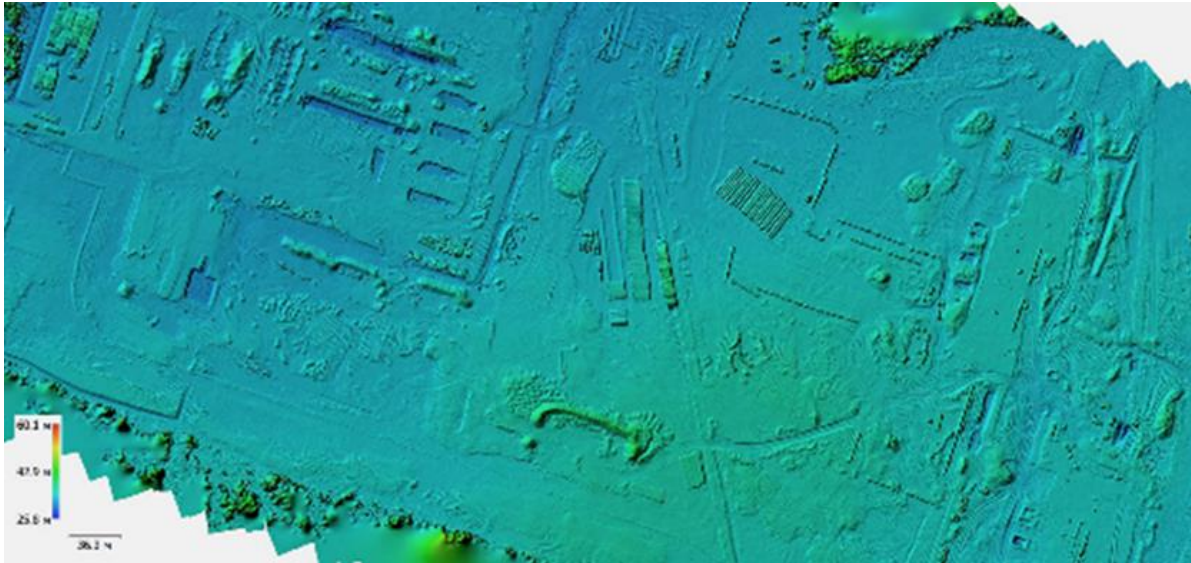


Рис. 2. Трехмерная цифровая модель участка реконструкции газораспределительной станции, построенная по данным цифровой аэрофотосъемки с использованием БПЛА

Fig. 2. Three-dimensional digital model of the reconstruction site of the gas distribution station, built according to digital aerial photography using a UAV



Рис. 3. Текстурированная цифровая модель местности участка реконструкции газораспределительной станции

Fig. 3. Textured digital terrain model of the reconstruction site gas distribution station

При выполнении работ по геотехническому мониторингу выявляют следующие экзогенные процессы, оказывающие влияние на объекты трубопровода:

- оползневые, образующиеся в зонах распространения легко выветриваемых полускальных или глинистых грунтов на наклонных поверхностях крутизной от  $10^\circ$  (рис. 4);
- карстовые, которые происходят в зонах распространения скальных грунтов карбонатного, гипсового, соляного, сульфатного состава (рис. 5);
- осыпные, которые характерны для не заросших растительностью наклонных поверхностей крутизной от  $20^\circ$  до  $50^\circ$ ;
- обвалы, происходящие на не заросших растительностью наклонных поверхностях крутизной более  $50^\circ$ ;



- суффозионные, которые возникают в зонах избыточного насыщения грунтовыми водами лёссовых, глинистых, песчаных, карбонатных растворимых грунтов;
- осадки грунта, происходящие в зонах разрыхления при проведении земляных работ;
- подтопления в местах, обусловленных подъемом уровня грунтовых вод при перекрытии, а также затруднении подземного или поверхностного стока;
- эрозионные, характерные для зон распространения рыхлых грунтов и мест переходов через постоянные водотоки на наклонных поверхностях крутизной от 3°;
- формирования курумов, расположенных в зонах распространения скальных и крупнообломочных грунтов на наклонных незадернованных поверхностях в условиях воздействия больших перепадов дневных и ночных температур, а также неравномерного нагревания и охлаждения;
- пучинообразования, свойственного зонам промерзания влажных грунтов и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда;
- наледеобразования в руслах водотоков, по бортам речных долин в зонах распространения ММГ;
- термокарста в зонах распространения залежей льда и сильнольдистых грунтов в верхней части многолетнемерзлой толщи;
- солифлюкции, которая происходит на наклонных поверхностях в зонах распространения рыхлых ММГ (глин, суглинков);
- селевые, которые происходят при выносе грязекаменного материала, в т. ч. оползневых масс, водными потоками при сильных паводках (рис. 6) (Ю.Б. Виноградов выделил наносоводные, грязевые и грязекаменные сели [Виноградов, 1980]).

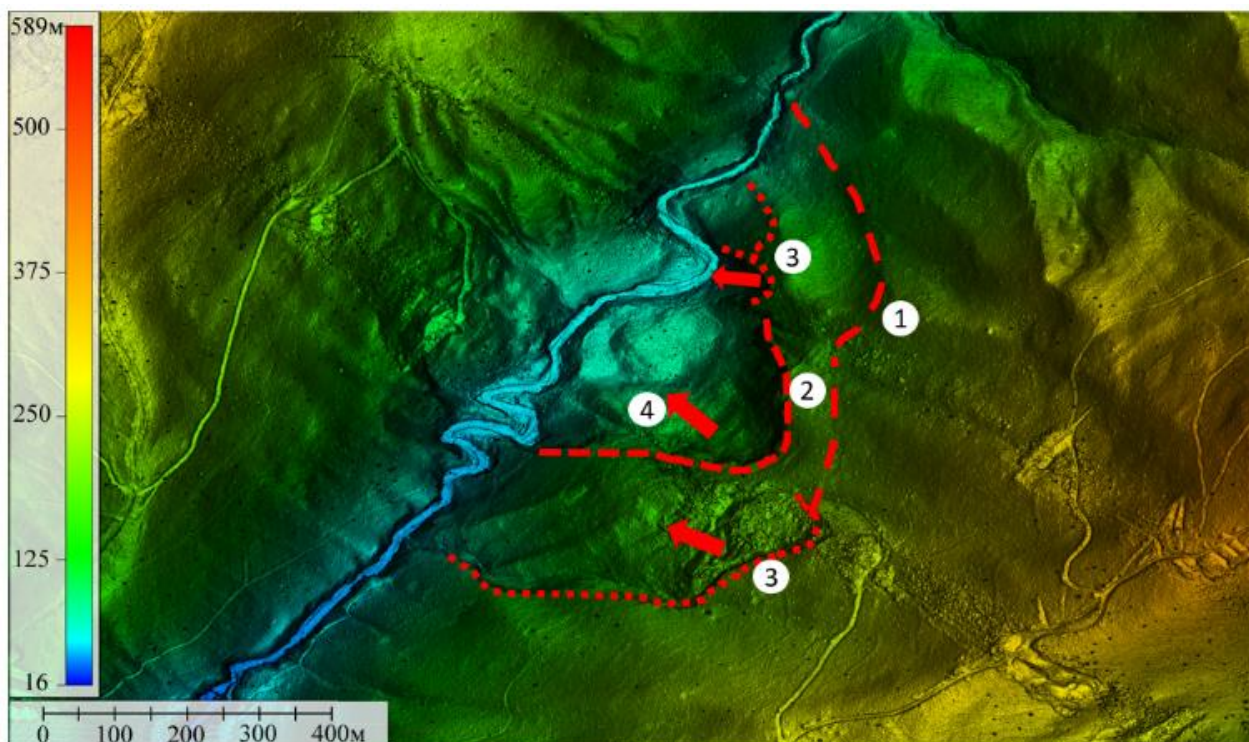


Рис. 4. Сейсмогенный оползень на цифровой модели рельефа: 1 – бровка срыва древнего оползня; 2 – бровка срыва оползня второй генерации длительной стабилизации; 3 – бровка срыва третьей генерации временной стабилизации; 4 – направление движения оползневых масс

Fig. 4. Seismogenic landslide on a digital relief model: 1 – edge bench of the disruption of an ancient landslide; 2 – edge bench of the disruption of the landslide of the second generation of long-term stabilization; 3 – edge bench of the disruption of the third generation of temporary stabilization; 4 – direction of movement of landslide masses



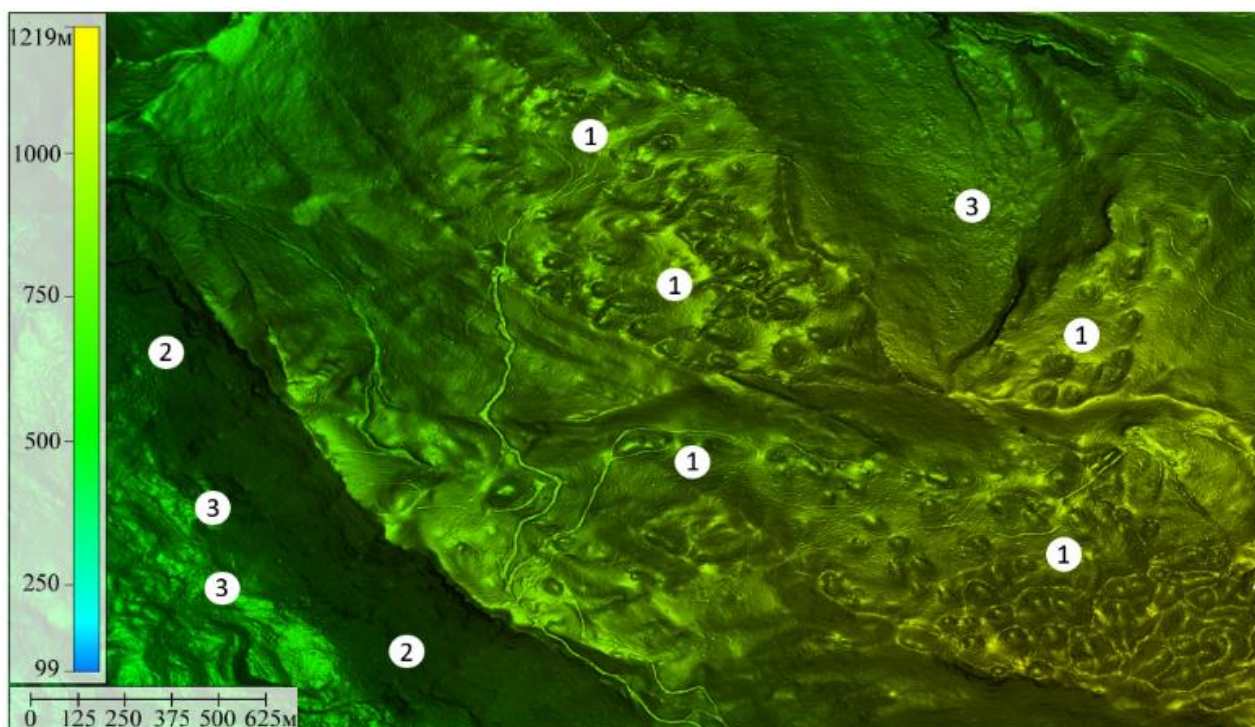


Рис. 5. Проявления карстовых и гравитационных склоновых процессов на цифровой модели рельефа: 1 – карстовая воронка; 2 – осыпь; 3 – оползень  
Fig. 5. Displays of karst and gravitational slope processes on the digital relief model: 1 – karst funnels; 2 – scree; 3 – landslide

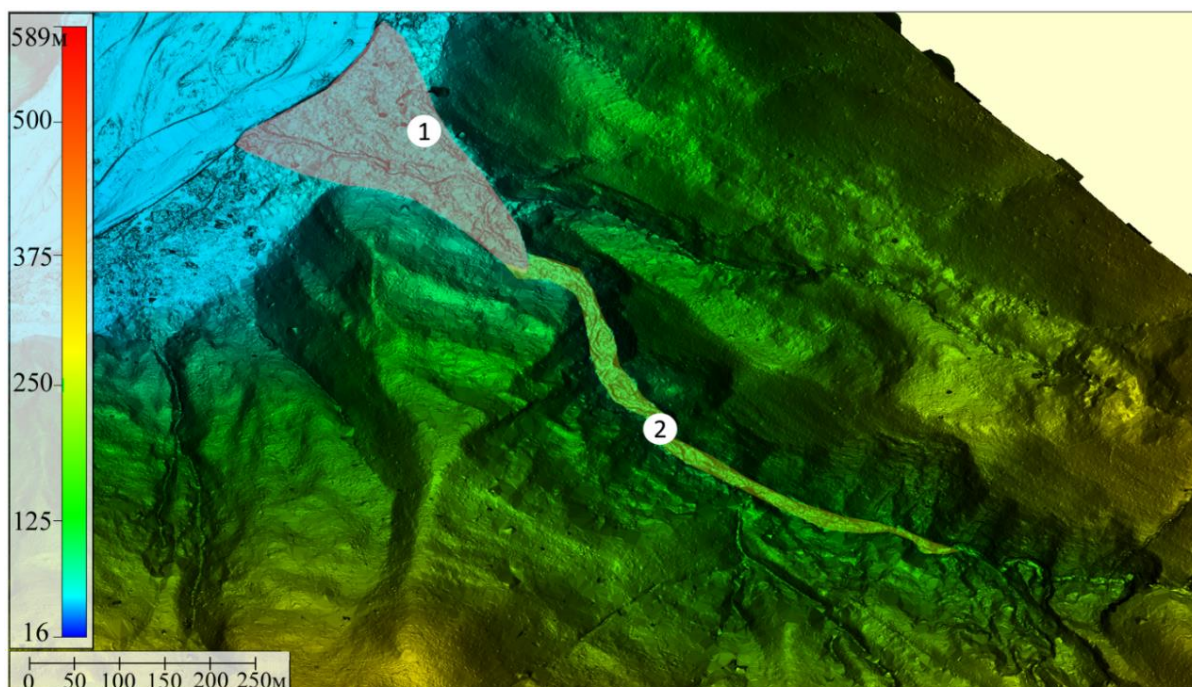


Рис. 6. Селевой бассейн на цифровой модели рельефа: 1 – конус выноса, частично переработанный рекой; 2 – русло  
Fig. 6 Mudflow basin on a digital elevation model: 1 – alluvial fan, partially reworked by the river; 2 – channel

Для крупных масштабов (М 1:2000 и крупнее) наиболее эффективным будет проведение ВЛС территории со сложными природными условиями для получения трехмерной цифровой модели местности и последующего дешифрирования ОГП. Для более уверенного дешифрирования работы по ВЛС могут быть дополнены цифровой АФС [Долгополов, 2021].

Для масштаба 1:500 фотоснимки должны иметь разрешение от 5–7 см на местности; плотность точек лазерного отражения – от 5–9 точек на м<sup>2</sup>. Ширина полосы съемки и камеральной обработки материалов ВЛС должна составлять не менее 150 м (не менее 75 м вправо и влево от оси трубопровода). Допускаются средние погрешности положения объектов дешифрирования 0,75 мм в масштабе плана или 40 см. На участках линейной части трубопровода, где распространены многолетние мёрзлые грунты (ММГ) и экзогенные геологические процессы (ЭГП), работы рекомендуется проводить 1 раз в год [РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-91.200.00-КТН-005-15; ГКИНП-02-033-82].

Мониторинг в масштабе 1:1000 с использованием ВЛС совместно с цифровой АФС в коридоре трассы магистрального нефтепровода в зоне сложных природно-климатических условий обеспечивается при получении фотоснимков с разрешением на местности от 7–10 см, плотности точек лазерного отражения – от 3–5 точек на м<sup>2</sup>. Для масштаба 1:2000 допускается использование фотоснимков с разрешением на местности от 10–15 см, плотность точек лазерного отражения – от 2–3 точек на м<sup>2</sup>. Средние погрешности положения объектов дешифрирования должны быть не более 0,75 мм в масштабе плана или карты, что составляет 75 см для М 1:1000 и 1,5 м для М 1:2000 на местности. Съёмочные работы рекомендуется проводить 1–2 раза в год [РД-23.040.00-КТН-124-20].

Картографирование и мониторинг в масштабах: 1:5000 и 1:10000 крупных проявлений ОГП в коридоре трассы магистрального нефтепровода на участках со сложными природными условиями можно осуществлять по данным геопривязанных космических снимков с пространственным разрешением 50 см или материалов АФС с разрешением снимков не менее 20 см. Погрешности положения точек при аэрофотосъёмке в масштабах 1:5000 и 1:10000 примерно одинаковы и составляют 0,4 мм на карте, что соответствует 2 и 4 метрам на местности соответственно. Полученные материалы должны иметь средние погрешности положения точек 0,75 мм в масштабе создаваемой карты, что составляет 3,75 м для М 1:5000 и 7,5 м для М 1:10000. Работы проводят с периодичностью 1–2 раза в год [РД-23.040.00-КТН-0034-20; РД-23.040.00-КТН-124-20].

Мониторинг береговых участков подводных переходов магистральных трубопроводов производится с целью определения: размывов берегов, развития оврагов, развития оползней, наличия провалов и пучения грунта, наличия древесной или кустарниковой растительности по оси нефтепровода. Для этих целей, как правило, используют технологию аэрофотосъёмки или (реже) технологию ВЛС, совмещенную с цифровой АФС, которые производят на участке подводного перехода магистрального нефтепровода через водную преграду с периодичностью 1 раз в квартал и после прохождения паводков. Съёмки должны обеспечивать точность 20 см в соответствии с требованиями отраслевых регламентов [ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02].

Построение карт смещений земной поверхности производится, как правило, с помощью радарной интерферометрии на участках трубопроводов, подверженных воздействию проявлений процессов, обусловленных сложными природно-климатическими условиями. Для объектов трубопроводного транспорта перспективным представляется использование в качестве постоянных отражателей УОВ, связанных с элементами инфраструктуры трубопровода, доработанных под выполнение задач радарной интерферометрии. Мониторинг смещения земной поверхности по данным космической радиолокационной съёмки требуется проводить 4 раза в год в связи с тем, что смещения можно обнаружить при анализе материалов съёмок, выполненных в разные сезоны года. Нормативных доку-



ментов с требованиями по точности к данным радарных съемок пока нет, поэтому они представлены в таблице на основании результатов проведенных исследований.

Данный вид съемки характеризуется наиболее активным развитием, расширяющимся в последние годы использованием в различных областях науки и практике работ, но крайне редко применяемым в нефтегазовой геологии. Уникальность радиолокационной съемки заключается в высочайшей точности измерений изменений рельефа земной поверхности за определенный период. Основные результаты, полученные благодаря использованию радиолокационной интерферометрии, сводились к изучению проседания земной поверхности [Fielding et al., 1998; Bernardi et al., 2021]. Возможности радиолокационных съемок, оцененные по результатам проведенных работ, позволяют использовать их при оценке воздействия тектонических и антропогенных процессов на резервуары и другие объекты мониторинга.

### Заключение

Мониторинг состояния трубопроводов и протекающих природных процессов в коридоре трассы – ключевая задача геотехнического мониторинга. Проводятся такие работы в соответствии с разработанными требованиями не реже 1 раза в год. При проведении работ по геотехническому мониторингу используют, как правило, наиболее современные методы съемки и диагностирования трубопроводов.

На основании проведенных исследований рекомендуется при производстве работ по геотехническому мониторингу на трубопроводном транспорте использовать ВЛС с применением УОВ. ВЛС следует выполнять в комплексе с высокоточными геодезическими методами, для контроля положения марок на объектах инфраструктуры целесообразно дополнительно использовать методы НЛС. Цифровую аэрофотосъемку обязательно выполнять с использованием БПЛА. Дальнейшие работы по научному обоснованию повышения качества геотехнического мониторинга следует направить по пути разработки методов использования радарной интерферометрии и создания с этой целью доступного программного обеспечения.

### Список источников

- Баборькин М.Ю. 2017. Устройство определения плано-высотного положения трубопровода. Патент на полезную модель № 173296. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU173296U1\\_20170821.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU173296U1_20170821.pdf) (дата обращения: 07 июня 2022).
- ГКИНП-02-033-82 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1: 5000, 1: 2000, 1: 1000, 1: 500 (утв. ГУГК СССР 05.10.1979). М.: Недра, 1982. 148 с. Дата сохранения: 16.05.2019. Официальный портал «Консультант Плюс». URL: <https://igpspb.ru/wp-content/uploads/2019/05/3.-GKINP-02-033-82.pdf> (дата обращения: 07 июня 2022).
- ГОСТ 31385–2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. М.: Стандартинформ, 2016. 90 с. Официальный портал АО «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200138636> (дата обращения: 07 июня 2022).
- ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02 Регламент технической эксплуатации переходов магистральных нефтепроводов через водные преграды. М.: ОАО «АК «Транснефть»», 2003. 133 с. Вебсайт ООО «Диагностические системы». URL: [http://dias-ltd.ru/upload/snip/or\\_13.01-60.30.00-ktn-002-3-02.pdf](http://dias-ltd.ru/upload/snip/or_13.01-60.30.00-ktn-002-3-02.pdf) (дата обращения: 07 июня 2022).
- РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю. М.: АО «НТЦ «Промышленная безопасность»», 2003. 47 с. Официальный портал АО «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/901865879> (дата обращения: 07 июня 2022).
- РД-17.020.00-КТН-129-18 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Геотехнический мониторинг. Организация и выполнение работ методом наземного лазерного сканирования. М.: ОАО «АК «Транснефть»», 2012. Служба НТИ. Современные информационные услуги. URL: [https://snti.ru/snips\\_rd39-2.htm](https://snti.ru/snips_rd39-2.htm) (дата обращения: 07 июня 2022).

- РД-23.040.00-КТН-0034-20 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Геотехнический мониторинг. Общие положения. Ч.1. М.: ПАО «Транснефть», 2020. 79 с.
- СП 365.1325800.2017. Свод правил. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения нефтепродуктов. М.: Стандартинформ, 2018. 72 с. Вебсайт Stroyinf.ru. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293735/4293735694.pdf> (дата обращения: 07 июня 2022).
- СП 305.1325800 Свод правил. Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. М.: Минстрой России, Стандартинформ, 2018. 105 с. Официальный портал АО «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/556330134> (дата обращения: 07 июня 2022).
- СП 22.13330 Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. М.: Минстрой России, Стандартинформ, 2017. 220 с. Официальный портал АО «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 07 июня 2022).
- СП 25.13330 Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минстрой России, Стандартинформ, 2021. 48 с. Официальный портал АО «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326> (дата обращения: 07 июня 2022).
- РД-91.200.00-КТН-005-15 Методика аэровизуального обследования коридора трассы магистрального нефтепровода. М.: ОАО «АК «Транснефть»», 2015. Портал нормативно-технической документации «Техдокумент.ру». URL: [http://www.texdokument.ru/news/show\\_85#.Yq3fqLJByHs](http://www.texdokument.ru/news/show_85#.Yq3fqLJByHs) (дата обращения: 07 июня 2022).

### Список литературы

- Аврунев Е.И., Уставич Г.А., Грекова А.О., Никонов А.В., Мелкий В.А., Долгополов Д.В. 2020. Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 331(7): 188–201. DOI 10.18799/24131830/2020/7/2729.
- Аникаева А.Д., Мартюшев Д.А. 2020. Оценка потенциала применения беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли. Недропользование, 20(4): 344–355. DOI 10.15593/2712-8008/2020.4.4.
- Антипов И.Т., Зяткова Л.К., Хлебникова Т.А. 2012. Оценка точности измерительных трехмерных видеосцен. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2–1: 52–57.
- Виноградов Ю.Б. 1980. Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеиздат, 144 с.
- Долгополов Д.В. 2020. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 25(4): 85–95. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95.
- Долгополов Д.В., Аврунев Е.И., Мелкий В.А., Веретельник Д.А., Жидиляева Е.В. 2022. Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 333(4): 168–180. DOI 10.18799/24131830/2022/4/3454.
- Долгополов Д.В., Баборыкин М.Ю., Мелкий В.А. 2021. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли. Интерэкспо Гео-Сибирь, 4(1): 25–32. DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32.
- Долгополов Д.В., Никонов Д.В., Мелкий В.А., Братков В.В. 2020. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям. Мониторинг. Наука и технологии, 2(44): 19–25. DOI 10.25714/MNT.2020.44.003.
- Долгополов Д.В., Никонов Д.В., Полуянова А.В., Мелкий В.А. 2019. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 24(3): 65–81. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81.
- Зяткова Л.К. 2004. Геомониторинг природной среды: в 2 т. Новосибирск, СГГА, 316 с.
- Карпик А.П., Антонович К.М., Твердовский О.В., Лагутина Е.К., Решетов А.П. 2014. Создание сети референсных станций для обеспечения мониторинга объектов транспорта нефти и нефтепродуктов. Интерэкспо Гео-Сибирь, S: 151–161.





- Карпик А.П., Хорошилов В.С., Комиссаров А.В. 2021. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 26 (6): 17–32. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32.
- Мажитова Г.З., Пашков С.В., Крыцкий С.В. 2020. Совершенствование методики крупномасштабного агроландшафтного картографирования на основе применения беспилотных летательных аппаратов. Региональные геосистемы, 44(1): 64–74. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-1-64-74.
- Маркелов В.М., Цветков В.Я. 2015. Геомониторинг. Славянский форум, 2(8): 177–184.
- Мячина К.В., Дубровская С.А., Ряхов Р.В. 2020. Роль нефтедобычи в развитии эрозионных процессов в сельскохозяйственных ландшафтах степной зоны. Региональные геосистемы, 44(3): 283–294. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-3-283-294.
- Савиных В.П. 2018. Пространственное ситуационное моделирование. ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении, 1(5): 92–104.
- Цветков В.Я. 2012. Геоинформационный геотехнический мониторинг. Науки о земле, 4: 54–58.
- Bernardi M.S., Africa P.C., de Falco C., Formaggia L., Menafoglio A., Vantini S. 2021. On the Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Monitoring and Forecasting Natural Hazards. *Mathematical Geosciences*, 53: 1781–1812. DOI: 10.1007/s11004-021-09948-8.
- Craglia M., Hradec J., Nativi St., Santoro M. 2017. Exploring the Depths of the Global Earth Observation System of Systems. *Big Earth Data*, 1(1–2): 21–46. DOI: 10.1080/20964471.2017.1401284.
- Dekavalla M. 2019. Investigation of Image Analysis, Geomorphometry and Knowledge Representation Methods for Landform Mapping. Greece, Athens, National Technical University of Athens (NTUA): 172. DOI: 10.12681/eadd/45541.
- Di Maio C., Fornaro G., Gioia D., Reale D., Schiattarella M., Vassallo R. 2018. In Situ and Satellite Long-Term Monitoring of the Latronico Landslide, Italy: Displacement Evolution, Damage to Buildings, and Effectiveness of Remedial Works. *Engineering Geology*, 245: 218–235. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.08.017.
- Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. 2021. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications. *Aerospace*, 8: 363. DOI: 10.3390/aerospace8120363.
- Fielding J., Blom G., Goldstein M. 1998. Rapid Subsidence Over Oil Fields Measured by SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 25(17): 3215–3218.
- Galton A. 2017. Processes and Events. In: *Encyclopedia of GIS*. Ed. By Shekhar S., Xiong H., Zhou X. Springer, Cham: 1661–1667. DOI: 10.1007/978-3-319-17885-1\_1032.
- Guan L., Pan H., Zou S., Hu J., Zhu X., Zhou P. 2020. The Impact of Horizontal Errors on the Accuracy of Freely Available Digital Elevation Models (DEMs). *International Journal of Remote Sensing*, 41(19): 7383–7399.
- Guo H. 2018. A Project on Big Earth Data Science Engineering. *Bull Chin Acad Sci*, 33(8): 818–824.
- Hodgson M.E., Piovan S.E. 2021. An Indoor Landscape for Instruction of 3-D Aerial Drone Imagery. *Journal of Geography in Higher Education*, 46: 145–159.
- Metternicht G., Mueller N., Lucas R. 2020. Digital Earth for Sustainable Development Goals. *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore: 443–471.
- Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N., Schwarz B. 2018. Multitemporal UAV Surveys for Landslide Mapping and Characterization. *Landslides*, 15: 1045–1052. DOI: 10.1007/s10346-018-0978-0, 4: 429–430.
- Singhroy V. 2020. *Advances in Remote Sensing for Infrastructure Monitoring*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Switzerland AG.: 362. DOI: 10.1007/978-3-030-59109-0.
- Tarolli P., Mudd S.M. 2020. Introduction to Remote Sensing of Geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 23: XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6.
- Tziavou O., Pytharouli S., Souter J. 2018. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Mapping in Engineering Geological Surveys: Considerations for Optimum Results. *Engineering Geology*, 232: 12–21.
- Yang Y., Du G.L., Cao Q.T. 2017. Application of UAV Aerial Surveying Technology in Geological Disaster Emergency Mapping. *Bull Surv Mapp*: 119.
- Yermolaev O., Usmanov B., Gafurov A., Vedeneeva E., Poesen J., Lisetskii F., Nicu I.C. 2021. Assessment of Shoreline Transformation Rates and Landslide Monitoring on the Bank of Kuibyshev Reservoir (Russia) Using Multi-Source Data. *Remote Sensing*, 13(21): 4214.

## References

- Avrunev E.I., Ustavich G.A., Grekova A.O., Nikonov A.V., Melkiy V.A., Dolgoplov D.V. 2020. Technological Solutions in Sphere of Geospatial Information on Long Distance Pipelines and Objects of Their Infrastructure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(7): 188–201 (in Russian). DOI 10.18799/24131830/2020/7/2729.
- Anikaeva A.D., Martyushev D.A. 2020. Assessment of the Unmanned Aerial Vehicle Potential Application in the Oil and Gas Industry. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 20(4): 344–355 (in Russian). DOI 10.15593/2712-8008/2020.4.4.
- Antipov I.T., Zyatкова L.K., Khlebnikova T.A. 2012. Otsenka tochnosti izmeritelnykh trekhmernykh videostsen [Assessment the Accuracy of Measuring Three-Dimensional Video Scenes]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2–1: 52–57.
- Vinogradov Yu.B. 1980. *Etyudy o selevykh potokakh [Etudes about mud stream]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 144 p.
- Dolgoplov D.V. 2020. Possibilities of Using Unmanned Aircraft Systems to Control Compliance of Construction Results of Pipeline Transport Facilities with Design Solutions. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 25(4): 85–95 (in Russian). DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95.
- Dolgoplov D.V., Avrunev E.I., Melkiy V.A., Veretel'nik D.A., Zhidilyaeva E.V. 2022. Analysis of Accuracy of Initial Data Used in Modeling Relief and Profile of the Main Pipelines Route. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333(4): 168–180 (in Russian). DOI 10.18799/24131830/2022/4/3454.
- Dolgoplov D.V., Baborykin M.Yu., Melkiy V.A. 2021. Monitoring of Hazardous Geological Processes in the Construction and Operation of Pipeline Transport Facilities by Remote Sensing Data. *Interesko Geo-Sibir'*, 4(1): 25–32 (in Russian). DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32.
- Dolgoplov D.V., Nikonov D.V., Melkiy V.A., Bratkov V.V. 2020. Interpretation of Trunk Pipeline Infrastructure by Aerospace Images. *Monitoring. Science & Technologies*, 2(44): 19–25 (in Russian). DOI 10.25714/MNT.2020.44.003.
- Dolgoplov D.V., Nikonov D.V., Poluyanov A.V., Melkiy V.A. 2019. Possibilities of Visual Interpretation of Trunk Pipelines and Infrastructure Facilities Using Satellite Images of High and Ultra-High Spatial Resolution. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 24(3): 65–81 (in Russian). DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81.
- Zyatкова L.K. 2004. *Geomonitoring prirodnoy sredy: v 2 t. [Geomonitoring of the natural environment: in 2 vol.]*. Novosibirsk, Publ. SGGa, 316 p.
- Karpik A.P., Antonovich K.M., Tverdovskiy O.V., Lagutina E.K., Reshetov A.P. 2014. Creating Reference Station Network for Monitoring Objects and Oil Transportation. *Interesko Geo-Sibir'*, S: 151–161 (in Russian).
- Karpik A.P., Khoroshilov V.S., Komissarov A.V. 2021. Analysis of Methods and Tools for Studying the Dynamics of Displacement of Landslides. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 26(6): 17–32 (in Russian). DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32.
- Mazhitova G.Z., Pashkov S.V., Krytskiy S.V. 2020. Improvement of the Methodology of Large-Scale Agrarian Landscape Mapping Based on UAV Application. *Regional Geosystems*, 44(1): 64–74 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-1-64-74.
- Markelov V.M., Tsvetkov V.Ya. 2015. Geomonitoring. *Slavic Forum*, 2(8): 177–184 (in Russian).
- Myachina K.V., Dubrovskaya S.A., Ryakhov R.V. 2020. The Role of Oil Production in the Acceleration of Soil Erosion in the Steppe Agricultural Landscapes. *Regional Geosystems*, 44(3): 283–294 (in Russian). DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-3-283-294.
- Savinych V.P. 2018. Space Situation Modeling. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*, 1(5): 92–104 (in Russian).
- Tsvetkov V.Ya. 2012. Geoinformation Geotechnical Monitoring. *Geoscience*, 4: 54–58 (in Russian).
- Bernardi M.S., Africa P.C., de Falco C., Formaggia L., Menafoglio A., Vantini S. 2021. On the Use of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for Monitoring and Forecasting Natural Hazards. *Mathematical Geosciences*, 53: 1781–1812. DOI: 10.1007/s11004-021-09948-8.
- Craglia M., Hradec J., Nativi St., Santoro M. 2017. Exploring the Depths of the Global Earth Observation System of Systems. *Big Earth Data*, 1(1–2): 21–46. DOI: 10.1080/20964471.2017.1401284.



- Dekavalla M. 2019. Investigation of Image Analysis, Geomorphometry and Knowledge Representation Methods for Landform Mapping. Greece, Athens, National Technical University of Athens (NTUA): 172. DOI: 10.12681/eadd/45541.
- Di Maio C., Fornaro G., Gioia D., Reale D., Schiattarella M., Vassallo R. 2018. In Situ and Satellite Long-Term Monitoring of the Latronico Landslide, Italy: Displacement Evolution, Damage to Buildings, and Effectiveness of Remedial Works. *Engineering Geology*, 245: 218–235. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.08.017.
- Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. 2021. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications. *Aerospace*, 8: 363. DOI: 10.3390/aerospace8120363.
- Fielding J., Blom G., Goldstein M. 1998. Rapid Subsidence Over Oil Fields Measured by SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 25(17): 3215–3218.
- Galton A. 2017. Processes and Events. In: *Encyclopedia of GIS*. Ed. By Shekhar S., Xiong H., Zhou X. Springer, Cham: 1661–1667. DOI: 10.1007/978-3-319-17885-1\_1032.
- Guan L., Pan H., Zou S., Hu J., Zhu X., Zhou P. 2020. The Impact of Horizontal Errors on the Accuracy of Freely Available Digital Elevation Models (DEMs). *International Journal of Remote Sensing*, 41(19): 7383–7399.
- Guo H. 2018. A Project on Big Earth Data Science Engineering. *Bull Chin Acad Sci*, 33(8): 818–824.
- Hodgson M.E., Piovan S.E. 2021. An Indoor Landscape for Instruction of 3-D Aerial Drone Imagery. *Journal of Geography in Higher Education*, 46: 145–159.
- Metternicht G., Mueller N., Lucas R. 2020. Digital Earth for Sustainable Development Goals. *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore: 443–471.
- Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N., Schwarz B. 2018. Multitemporal UAV Surveys for Landslide Mapping and Characterization. *Landslides*, 15: 1045–1052. DOI: 10.1007/s10346-018-0978-0, 4: 429–430.
- Singhroy V. 2020. *Advances in Remote Sensing for Infrastructure Monitoring*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry, Switzerland AG.: 362. DOI: 10.1007/978-3-030-59109-0.
- Tarolli P., Mudd S.M. 2020. Introduction to Remote Sensing of Geomorphology. *Developments in Earth Surface Processes*, 23: XIII–XV. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.09992-6.
- Tziavou O., Pytharouli S., Souter J. 2018. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Mapping in Engineering Geological Surveys: Considerations for Optimum Results. *Engineering Geology*, 232: 12–21.
- Yang Y., Du G.L., Cao Q.T. 2017. Application of UAV Aerial Surveying Technology in Geological Disaster Emergency Mapping. *Bull Surv Mapp*: 119.
- Yermolaev O., Usmanov B., Gafurov A., Vedeneeva E., Poesen J., Lisetskii F., Nicu I.C. 2021. Assessment of Shoreline Transformation Rates and Landslide Monitoring on the Bank of Kuibyshev Reservoir (Russia) Using Multi-Source Data. *Remote Sensing*, 13(21): 4214.

*Поступила в редакцию 23.06.2022;  
поступила после рецензирования 11.07.2022;  
принята к публикации 15.08.2022*

*Received June 23, 2022;  
Revised July 11, 2022;  
Accepted August 15, 2022*

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Долгополов Даниил Валентинович**, кандидат технических наук, начальник отдела управления проектами Департамента прикладных систем, ЗАО «Ай Ко», г. Москва, Россия

**Мелкий Вячеслав Анатольевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Daniil V. Dolgoplov**, Ph.D. Technical Sciences, Head of the Project Management Department of the Department of Applied Systems, CJSC "Ai Co", Moscow, Russia

**Vyacheslav A. Melkiy**, Doctor of Technical, Leading Researcher of the laboratory of Volcanology and volcanic hazard of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia



**Баборыкин Максим Юрьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, главный аналитик Центра геоинформационных систем, АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Республика Татарстан

**Maxim Yu. Baborykin**, Ph.D. Geological and Mineralogical Sciences, Chief analyst at the Center for Geoinformation Systems, Autonomous Non-profit Organization "University of Innopolis", Innopolis, Republic of Tatarstan