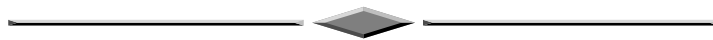


ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.88.041.1:621.64

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-40-50>

Определение дешифровочных признаков экзогенных геологических процессов при мониторинге земель трубопроводного транспорта по данным аэросъемок

Д. В. Долгополов ¹, Ф. А. Шевчик ¹, Е. М. Макарычева ¹, В. А. Мелкий ²✉

¹ Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта,
г. Москва, Российская Федерация

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения
Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Аннотация. Выявление земель, подверженных воздействию экзогенных геологических процессов (ЭГП), по данным дистанционного зондирования Земли, иногда может вызывать затруднения даже у опытных специалистов в области дешифрирования материалов съемок. Распознавание наиболее значимых и однозначно определяемых дешифровочных признаков того или иного процесса является непростой задачей, решение которой требует внимательного изучения большого количества материалов, отснятых на территориях, где распространены ЭГП. В работе использовались материалы воздушного лазерного сканирования и цифровой аэросъемки участков трассы трубопровода с проявлениями экзогенных процессов, которые обеспечили построение ортофотоплана и цифровой модели рельефа, представленной в виде теневой отмывки рельефа и карты уклонов. В результате исследования данных дистанционного зондирования участков с зонами развития ЭГП составлены описания дешифровочных признаков каждого из этих процессов.

Ключевые слова: дешифровочные признаки, экзогенные геологические процессы, воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, теневая отмывка рельефа, карта уклонов

Для цитирования:

Долгополов Д. В., Шевчик Ф. А., Макарычева Е. М., Мелкий В. А. Определение дешифровочных признаков экзогенных геологических процессов при мониторинге земель трубопроводного транспорта по данным аэросъемок. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-40-50>

Aerial survey-based detection of exogenous geological features in pipeline infrastructure monitoring

D. V. Dolgopolov¹, F. A. Schevchik¹, E. M. Makarycheva¹, V. A. Melkiy²✉

¹ Research Institute of Pipeline Transport (Transneft Research Institute LLC),
Moscow, Russian Federation

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Abstract. Identifying lands affected by exogenous geological processes (EGPs) using Earth remote sensing (ERS) data poses challenges even for experienced interpreters. Identifying the most diagnostic and unambiguous deciphering features of specific processes demands meticulous analysis of extensive imagery from EGP-prone terrains. The study employed airborne laser scanning and digital aerial photography data from pipeline sections exhibiting EGP manifestations. These datasets facilitated orthophotomap generation and digital elevation model visualization via shaded relief and slope maps. Consequently, comprehensive descriptions of deciphering features for each EGP were compiled from the analyzed ERS data of affected zones.

Keywords: decryption features, exogenic geological processes, aerial laser scanning, aerial photography, shaded relief, slope map

For citation:

Dolgopolov D. V., Schevchik F. A., Makarycheva E. M., Melkiy V. A. (2026). Aerial survey-based detection of exogenous geological features in pipeline infrastructure monitoring. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 1. pp. 40–50. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-40-50>

Введение

Вопросам дешифрирования ЭГП посвящены труды многих ученых. Распознаванию обвалов посвящены работы А. Т. Зверева [1], оползней – В. Г. Бондура [2], А. П. Карпика, В. С. Хорошилова, А. В. Комиссарова [3, 4], W. Carter & R. Shrestha [5], Y. Takada & G. Motono [6], подтоплений – К. И. Кузеванова, Е. Ю. Пасечник [7], изменений рельефа при морозном воздействии или растеплении в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов – В. И. Богоявленского [8, 9] и др. В частности, в одном из исследований предложен метод построения и использования горизонталей при дешифрировании оползней [10] (рис. 1). Вместе с тем, по мнению авторов, целесообразней использовать трехмерную цифровую модель рельефа и построенную на ее основе карту уклонов, как это будет показано ниже. Цель настоящей статьи – описание дешиф-

ровочных признаков экзогенных геологических процессов по данным ВЛС и ЦАС.

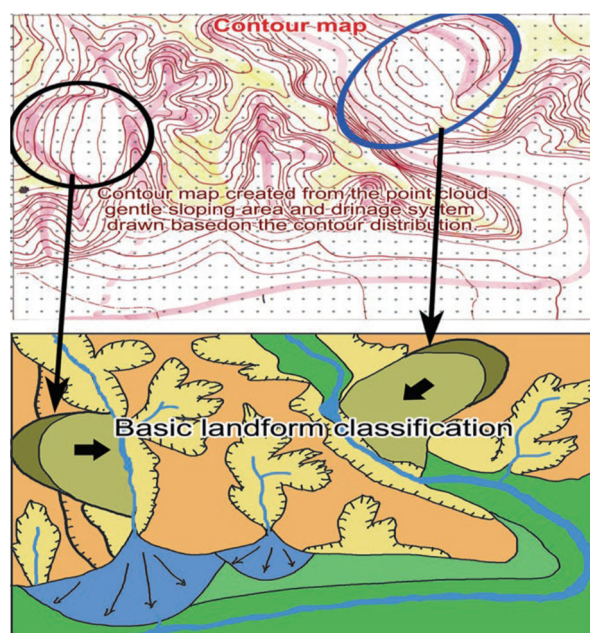


Рис. 1. Использование горизонталей при дешифрировании оползней (по [10])

Материалы и методы

Исследования проводились по материалам мониторинга трассы трубопровода в Восточной Сибири в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Опыт предыдущих исследований ЭГП средствами ВЛС показывает, что для выявления опасных экзогенных геологических процессов минимальная плотность точек лазерного отражения для масштаба 1: 500 должна составлять не менее 5–9 точек/м² [11].

Съемки выполнялись с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK, оснащенного лидаром CHCNAV Alpha Air 450. Платформа DJI Matrice 300 имеет достаточную грузоподъемность, обеспечивает высокую надежность, устойчивость к сложным погодным условиям, а также значительное полетное время.

Съемки проводились в июле, в условиях полярного дня, при круглосуточном солнечном освещении, что позволило эффективно выполнить поставленные задачи в сжатые сроки. Мобильность БПЛА и точность лидара позволили получить данные, необходимые для изучения геологических процессов, протекающих на территории.

В ходе геотехнического мониторинга трасс магистрального трубопровода получено облако точек с плотностью 40 точек/м². Это позволило авторам опираться на подходы, изложенные в работах [11, 12], при дешифрировании ЭГП по данным ВЛС. В работе использовались данные ВЛС и ЦАС, полученные с беспилотного воздушного судна (высота съемки – 100 м, плотность точек лазерных отражений – 40 точек/м²).

По результатам ЦАС был построен ортоплан коридора трассы. Облако лазерного сканирования, полученное по материалам ВЛС, было классифицировано, получен класс «земля» и с использованием точек класса «земля» построена цифровая модель рельефа. Возможности обработки данных при помощи ArcGIS детально рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе [13–15]. Для дальнейшего использования при дешифрировании ЭГП в геоинформационной си-

стеме цифровая модель рельефа была представлена в виде растровых изображений: теневой отмывки рельефа и карты уклонов.

Современные технические средства съемки и программное обеспечение для обработки данных позволяют существенно упростить выделение проявлений ЭГП на территории. Существенные изменения претерпели процессы формализации и воспроизводимости: при традиционном дешифрировании процесс интерпретации часто неформализован, что затрудняет его передачу, воспроизводимость и включение в автоматические системы, а при использовании современных средств ЦАС, ВЛС и программного обеспечения способы интерпретации могут быть «вшиты» в алгоритмы, что повышает воспроизводимость результатов и позволяет стандартизировать анализ.

При визуальном дешифрировании ЭГП специалист ищет на снимках признаки активности (например, свежее обнаженные отложения, изрезанность рельефа, русла), сравнивая их с образцами и используя собственные знания. Современное дешифрирование данных ЦАС + ЦМР / ВЛС позволяет:

- количественно описать изменение рельефа (например, площадь наледообразования, скорость развития оврага);
- автоматически выделить ложбины, бровки эрозионных борозд, оползневые образования на больших территориях;
- точно измерить параметры рек, оврагов (ширина, глубина, структура берегов, пойм, террас и др.);
- анализировать взаимосвязь параметров рельефа и скорости эрозии или развития других процессов;
- создавать динамические модели эрозии или лавовых потоков, основанные на реальной геометрии рельефа.

Таким образом, современные методы основаны на использовании многообразных данных, значительной автоматизации и высокой точности измерений, что позволяет вовлекать в процесс распознавания гораздо большее количество информации о геологических процессах, чем при традиционном визуальном подходе.

Результаты исследования и обсуждение

Важной задачей мониторинга протяженных трасс магистральных трубопроводов на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов является выявление и контроль протекания экзогенных геологических процессов, представляющих опасность для трубопровода.

Морозобойное растрескивание и формирование полигонально-жильных образований (ПЖО) хорошо дешифрируется по выраженному полигональному рельефу. На теневой отмывке рельефа и карте уклонов прослеживаются относительно гладкие поверхности полигонов и часто пересекающиеся ровные межполигональные понижения, образующие полигонально-сетчатый рисунок, конфигурация которого зависит от состава и механических свойств пород: в однородных массивах горных пород образуются прямоугольные сети, а в неоднородных – сети сложной конфигурации из многоугольников с четырьмя и более сторонами (рис. 2). Размеры полигонов в резко континентальном климате составляют от 0,5 до 12 м, а в менее континентальных условиях от 20 до 80 м. Ширина раскрытия межполигональных канав может достигать 6–8 м и более. Развитие повторно-жильных льдов приурочено к периодически покрываемым водой преимущественно супесчано-суглинистым и торфяным участкам аккумулятивного рельефа (речные долины, озерные котловины), а также пологим склонам и междуречьям в северных районах криолитозоны.

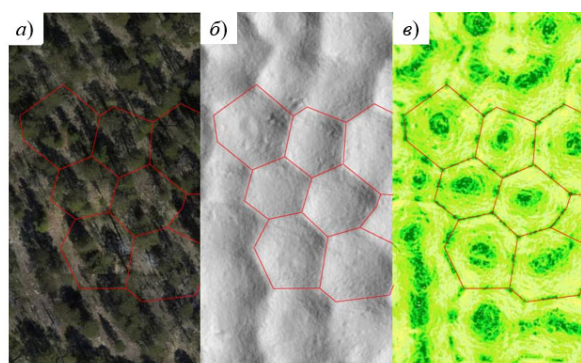


Рис. 2. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком ПЖО:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Морозное пучение на изображениях, построенных по данным ВЛС, распознается в виде округлых повышений земной поверхности (бугров), встречающихся группами или одиночно, разных размеров и форм, приуроченных к увлажненным участкам с затрудненным стоком и заторфованной поверхностью. На изображениях ЦАС возможна фиксация выходов льда и радиальных трещин в пределах бугров пучения. Миграционные бугры пучения имеют высоту от 30–40 см до 1,5–2,0 м, инъекционные – от 1–2 до 25–30 м и диаметр от нескольких метров до 50–60 м и более. На теневой отмывке рельефа дешифрируются по выпуклым, чаще овальным или округлым формам. На карте уклонов бугры имеют четкие округлые или овальные выпуклые формы с ассиметричными склонами, замкнутым контуром и ровной поверхностью (рис. 3).

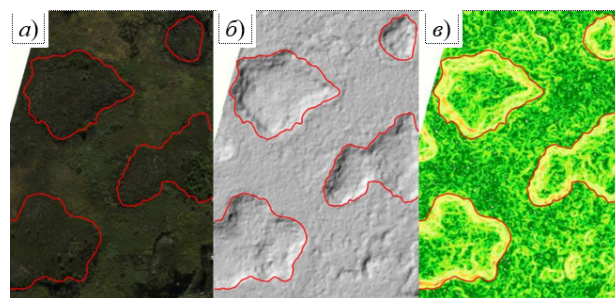


Рис. 3. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участками морозного пучения:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Наледеобразование в рельефе дешифрируется в виде плосковыпуклых ледяных тел – наледей и наледных полей, которые образуются при послойном замерзании различных вод (подземных, речных, озерных, смешанного питания) при их многократном излиянии на поверхность. Размеры наледей изменяются от очень мелких (площадью до 1 000 м²) до гигантских (площадью более 10⁷ м²). **Наледи** хорошо фиксируются на изображениях ЦАС после полного схода снежного покрова по фототону (рис. 4). На теневой отмывке рельефа и карте уклонов выделяются в виде пятен различной формы

с однородным рисунком, отсутствием микроформ рельефа и перепадов высот в пределах контура.

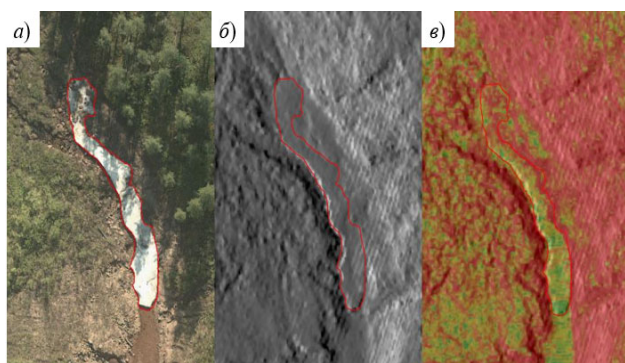


Рис. 4. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком наледообразования:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Термокарст фиксируется в области развития криолитозоны по выявлению просадочных и провальных отрицательных форм рельефа земной поверхности, таких как озера, блюдцевидные понижения, замкнутые котловины, аласы, впадины, воронки, западины и т. д. На изображениях ЦАС термокарст фиксируется по изменению фототона (темные пятна округлой формы). Признаками активного термокарста являются «пьяный лес», трещины отседания, деформации техногенных объектов. Термокарст приурочен к определенным типам рельефа, для которых характерно развитие льдов и сильнольдистых грунтов (например, у подошв склонов речных долин, уступов надпойменных террас, в тыловых швах пойм и надпойменных террас, в поймах рек, на заболоченных поверхностях междуречий). Угасающая стадия термокарстовых озер на снимках выглядит как осушающиеся котловины неправильной формы, с нечеткими контурами. На теневой отмывке рельефа выделяются замкнутые округлые пятна с отсутствием микроформ рельефа, на слоях цифровой модели местности (ЦММ) контуры проявлений хорошо выражены, имеют четкие очертания, резкую бровку и преимущественно крутые склоны (рис. 5).

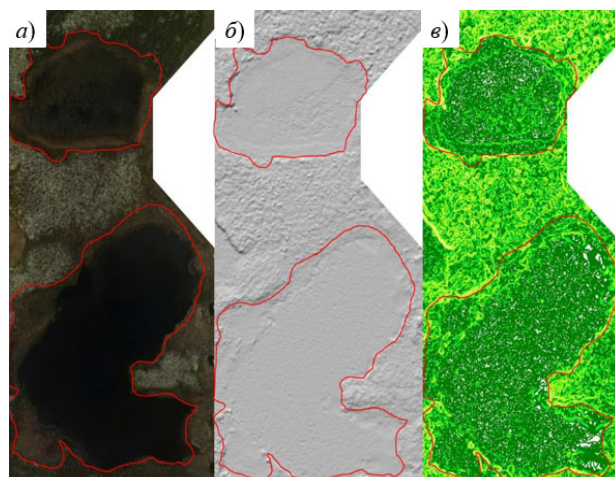


Рис. 5. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком термокарста:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Карст – результат растворения и/или разрушения горных пород водами. Зачастую карстовые процессы происходят с образованием пустот и пещер. На изображениях ЦАС и теневой отмывке рельефа хорошо дешифрируется по воронкообразным, блюдцеобразным сухим понижениям, провалам (западины, воронки, рвы, пещеры, увалы, карстовые блюдца) с выходами растворимых скальных пород по бортам (рис. 6). На карте уклонов выделяются округлые понижения с характерными конусообразными крутыми склонами.

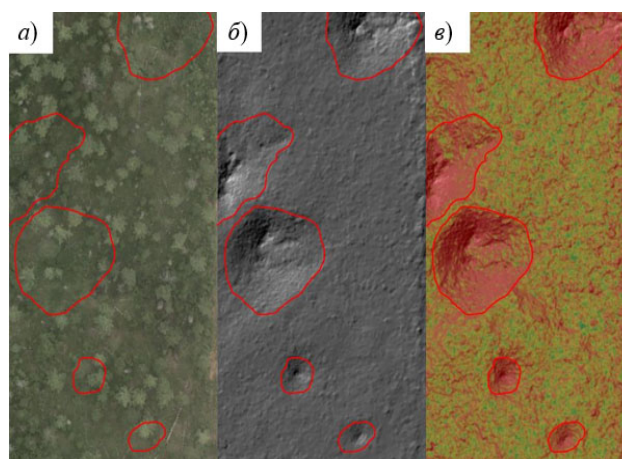


Рис. 6. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с закарстованным участком:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Эрозия и термоэрозия проявляются на наклонных поверхностях крутизной более 3° в зонах распространения рыхлого грунта и в районах переходов через постоянные водотоки. Визуальными признаками процесса на изображениях ЦАС являются извилистые линейные понижения с измененным фототонном (промоины, овраги, русла), с четкими границами на теневой отмывке рельефа и перепадами высот по контуру проявлений (крутосклонными 15° и более) на карте уклонов, развивающиеся вследствие поверхностного выноса рыхлого грунта водотоками. Вершины интенсивно растущих оврагов имеют округлые в плане очертания и крутые, врезанные стенки. Медленно растущие овраги имеют более узкие и пологие вершины. Промоины отличаются большой извилистостью (рис. 7). При речной эрозии отмечаются участки русла, подмываемые водотоком, с крутым (обрывистым) незадернованным склоном, резкой четкой бровкой и пологим дном. При термоэрозии также фиксируются трещины отседания.

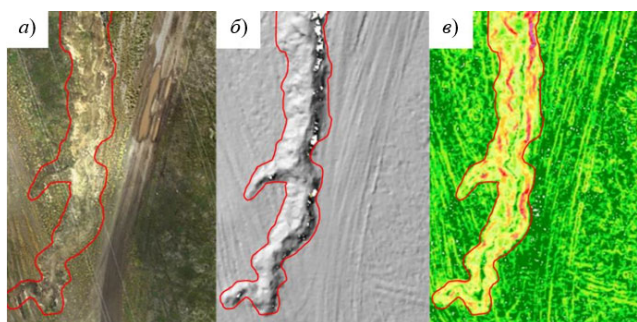


Рис. 7. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком развития эрозии:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Термоабразия широко развита в криолитозоне по берегам морей, озер и водохранилищ. Формируется при разрушении мерзлых береговых пород под воздействием механической энергии волн и тепла воды. В рельефе проявляется в отступании берегов в результате размыва и выноса породы. На изображениях ЦАС дешифрируется по изменению фототона, трещинам отседания. На теневой от-

мывке рельефа и карте уклонов фиксируется четкая береговая линия с преимущественно крутым склоном (рис. 8). При долговременном однонаправленном ветровом воздействии термоабразия будет формировать озерные котловины вытянутой формы.

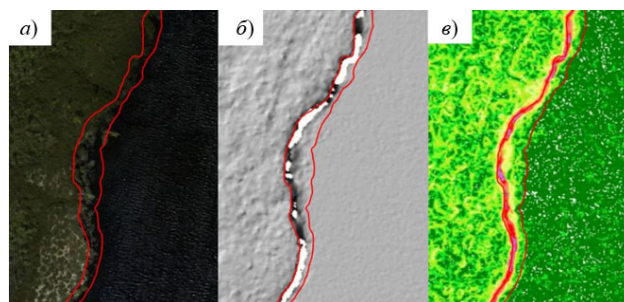


Рис. 8. Фрагменты изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком развития термоабразии по берегу озера:

а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа; в) карта уклонов

Подтопление – процесс, при котором в результате изменения водного режима и баланса на территории происходит повышение уровня (напора) подземных вод и/или влажности грунтов при перекрытии или затруднении подземного или поверхностного стока. Часто формируется и развивается на участках с антропогенными изменениями рельефа: колеи дорог, бровка обваловки обратной засыпки или насыпи. Визуальными признаками процесса являются длительно существующие обводненные участки, которые выражаются в изменении и потемнении фототона на изображениях ЦАС. На ЦММ визуально определяются пятна различной формы с однородным рисунком, отсутствием микроформ рельефа и перепадов высот в пределах контура (рис. 9).

Обвалы и осыпи происходят на склонах крутизной не менее 20° без растительного покрова с нагромождением обломочного материала (дресвы, щебня, глыб) у подножия склонов. Визуальными признаками развития гравитационных склоновых процессов (осыпей, обвалов и др.) на крутых участках, где возможно их развитие, является наличие стенок отрыва, трещин и рвов отседания, свежих

вывалов обломочного материала (рис. 10). У осыпей выделяют осыпные лотки (область транзита осыпи) и сопряженные с ними осыпные конусы и шлейфы, у обвалов – стенки срыва, тело обвала, представляющее собой скопление хаотично залегающих, как правило, неотсортированных глыб различного размера, валы выдавливания.

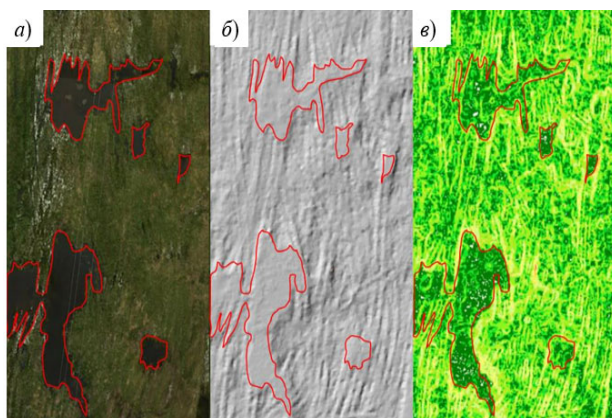


Рис. 9. Фрагмент изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с подтопленным участком:

- а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа;
в) карта уклонов

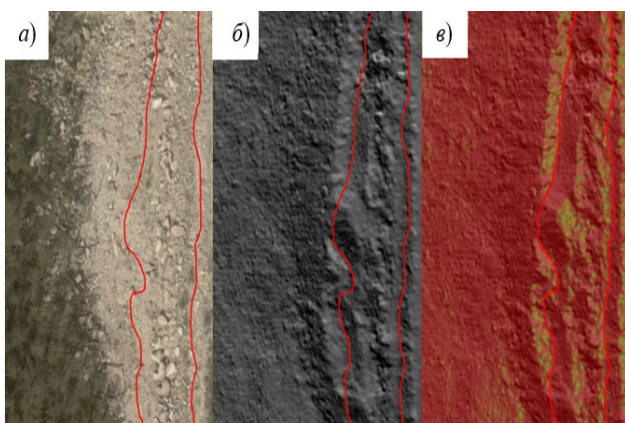


Рис. 10. Фрагмент изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с осыпным лотком на участке:

- а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа;
в) карта уклонов

Курумообразование – процесс скопления в осыпных лотках разной крутизны и у под-

ножий склонов плащеобразно залегающего, подвижного крупнообломочного материала из крепких магматических или метаморфических пород. По форме в плане различают линейные и площадные курумы. На поверхности курума отсутствует древесная растительность. Обломочные отложения активных курумов обычно не покрыты лишайниками (определяется по цвету). На ЦММ и аэроснимках хорошо дешифрируются линейно-вытянутые образования различной формы с ярко выраженными перепадами микрорельефа (рис. 11). На аэроснимках выделяются массивы дресвяно-глыбово-щебнистого материала.

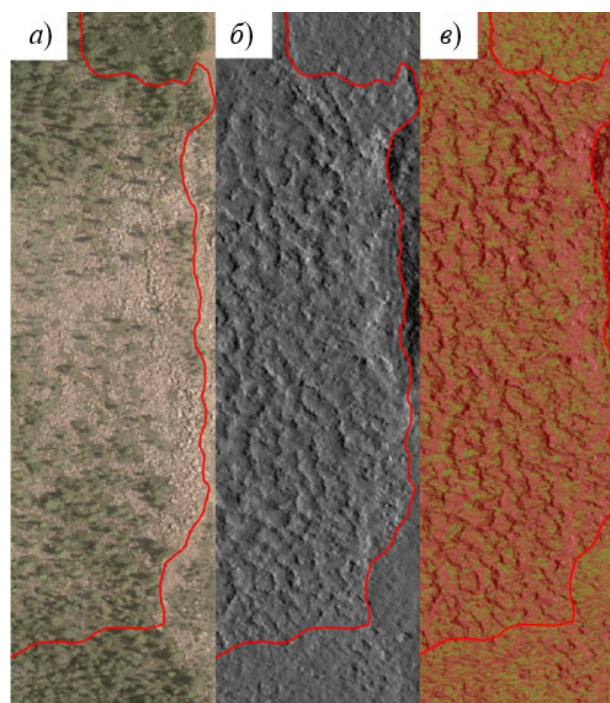


Рис. 11. Фрагмент изображений, построенных по данным ВЛС и ЦАС, с участком курума:

- а) ортоплан; б) теневая отмывка рельефа;
в) карта уклонов

По результатам проведенных исследований составлена таблица дешифровочных признаков ЭГП для их выявления и картирования с использованием материалов цифровой аэросъемки и воздушного лазерного сканирования: ортоплана и ЦМР, в виде отмывки рельефа и цифровой модели уклонов.

Дешифровочные признаки экзогенных геологических процессов

ЭГП	Дешифровочные признаки форм проявления процессов
Полигонально-жильные образования	Полигональный рельеф. Конфигурация полигонов от прямоугольной до многоугольной с размерами от 0,5–12 до 20–80 м, разделенных морозобойными трещинами или полигональными канавами. Приурочены к увлажненным участкам аккумулятивного рельефа (речные долины, озерные котловины), пологим склонам, междуречьям
Морозное пучение	Округлые повышения земной поверхности (бугры), встречающиеся группами или одиночно. Бугры разных размеров и форм, приуроченные к увлажненным участкам с затрудненным стоком и заторфованной поверхностью. Возможна фиксация выходов льда в пределах бугров пучения
Наледообразование	Наледи, наледные поляны, скопления льда. Приурочены к долинам рек и ручьев, к склонам и конусам выноса, ледникам и приледниковым зонам
Термокарст	Просадочные формы, бугристо-западинный рельеф, озера, блюдцевидные понижения, замкнутые котловины, аласы, хасыреи, байджерахи, западины и т. д. Приурочены к подошвам склонов речных долин, тыловым швам пойм и террас, заболоченным поверхностям междуречий. Осушающиеся котловины неправильной формы, с нечеткими контурами
Карст	Воронкообразные, блюдцеобразные сухие понижения, провалы (западины, воронки, рвы, пещеры, увалы, карстовые блюдца). Выявляются признаки нарушения растительности за счет образования новых провалов
Эрозия и термоэрозия	Извилистые линейные понижения (промоины, рывины, овраги, балки, конуса выноса, русла) с четкими границами и перепадами высот по контуру проявлений (крутосклонными 15 градусов и более)
Термоабразия	Отступление бровки береговых склонов и уступов акваторий (озер, морей), термоабразионные уступы, трещины отседания, цирки, прибрежные отмели
Подтопление	Изменение и потемнение фототона на изображениях ЦАС. На ЦММ пятна различной формы с однородным рисунком. Отсутствие микроформ рельефа и перепадов высот в пределах контура
Обвалы и осыпи	Склон крутизной не менее 20° без растительного покрова. Нагромождение крупнообломочного материала (дресвы, щебня, глыб) у подножия склона. Наличие трещин и рвов отседания, свежих участков стенки отрыва. В рельефе дешифрируются блоковые, глыбовые, земляные обвально-осыпные тела, конуса, валы выдавливания
Оползни	Склон крутизной не менее 10°, с нарушенным растительным покровом («пьяный лес», разрыв травянистого покрова, наличие незадернованных участков). Понижения поверхности (западины, трещины отседания/растяжения, террасы) в верхней части склона. Повышения поверхности (бугры, валы выпирания и наплывы) в нижней части склона. Следы смещения блоков и массивов грунта на склонах средней и большой крутизны, бровки и стенки срыва, цирки, языки оползня, рвы, следы надвигания и смятия
Курумообразование	Скопление грубообломочного материала по склону крутизной меньше угла естественного откоса обломков. На ЦАС курумы-потоки, курумы-поля, курумовые террасы. На ЦММ линейно-вытянутые образования различной формы с ярко выраженными перепадами микрорельефа

Воздушное лазерное сканирование проводилось с целью создания высокоточной цифровой модели рельефа для выявления опасных экзогенных геологических процессов по их проявлениям. Такие геологические процессы представляют серьезную угрозу для строительства и в период эксплуатации магистральных трубопроводов, так как они способны вызывать сме-

щения грунта, что может привести к деформации инженерных сооружений. Анализ геологических условий по данным ДЗЗ позволяет инженерам идентифицировать зоны повышенного риска, а также разрабатывать рекомендации по оптимальному размещению объектов инфраструктуры с учетом геологических особенностей местности.

Заключение

Применение лазерного сканера на базе БПЛА позволяет обеспечивать плотность точек сканирования до 40 точек/м² и получить детализированную цифровую модель рельефа. Оснащение лидара встроенной ГНСС-системой и инерциальным блоком позволило обеспечить высокую точность геопозиционирования даже в условиях отсутствия стабильного сигнала спутников, что было особенно актуально при проведении исследований в арктической зоне.

Проведенные полевые экспедиционные исследования подтвердили эффективность использования данных ВЛС для выявления и мониторинга опасных экзогенных процессов. В частности, удачными оказались решения по использованию в процессе теневой отмывки рельефа и карты уклонов при дешифрировании ЭГП. Формализация дешифровочных признаков опасных процессов необходима в том числе для автоматизации процесса дешифрирования опасных процессов по материалам ДЗЗ, что обеспечивает решение важной задачи при мониторинге состояния протяженных трасс магистральных трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зверев А. Т., Аджян А. А. Оценка инженерно-геологической опасности обрушения горных массивов вокруг озера Сарезское (Центральный Памир). Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 4. С. 90–93.
2. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. Оценка реактивации оползня на реке Бурей методами радарной интерферометрии. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 83–89. DOI 10.31857/S2686739722020025.
3. Карпик А. П., Хорошилов В. С., Комиссаров А. В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 6. С. 17–32. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32.
4. Khoroshilov V. S., Kobeleva N. N., Noskov M. F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2022. Vol. 8, № 2. P.733–744. DOI 10.22055/JACM.2022.38005.3129.
5. Carter W., Shrestha R., Tuell G., Bloomquist D., Sartory M. Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography. Edvancing Earth and Space science. 2001. Vol. 82, Issue 46. P. 549–555. DOI 10.1029/01EO00321.
6. Takada Y., Motono G. Spatiotemporal behavior of a large-scale landslide at Mt. Onnebetsudake, Japan, detected by three L-band SAR satellites. Earth Planets Space, 72, 131 (2020). DOI 10.1186/s40623-020-01265-4 .
7. Кузеванов К. И., Пасечник Е. Ю., Чилингер Л. Н. Оперативная оценка риска развития подтопления для внесения сведений в Единый государственный реестр недвижимости с использованием ГИС-технологий (на примере Обь-Томского междуречья). Геоинформатика. 2021. № 1. С. 11–21. DOI 10.47148/1609-364x-2021-1-11-21.
8. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Изучение взрывной дегазации Земли из криолитозоны Арктики на Бованенковском месторождении с применением БПЛА. Наука и техника в газовой промышленности. 2024. № 1 (97). С. 59–68.
9. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Кишанков А. В., Корниенко С. Г., Никонов Р. А., Сизов О. С. Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата. Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. № 3(42). С. 235–263. DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15.
10. Miyagi T., Ikeda K., Ishikawa H., Doan L., Thanh Nguyen Kim, Tien Pham Van, Li Y., and Zhang F. Interpretation and Mapping for the Prediction of Sites at Risk of Landslide Disasters: From Aerial Photography to Detection by DTMs. Abolmasov, B., et al. Progress in Landslide Research and Technology, Volume 3 Issue 1, 2024. Springer, Cham., DOI 10.1007/978-3-031-55120-8_2.

11. Долгополов Д. В., Мелкий В. А., Баборыкин М. Ю. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте. Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 339–355. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355. EDN ABWPNH.
12. Долгополов Д. В., Баборыкин М. Ю., Жидиляева Е. В., Мелкий В. А. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте. Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 2 (52). С. 25–34. DOI 10.25714/MNT.2022.52.003. EDN YCMEZK.
13. Meng X., Currit N., Zhao K. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. Remote Sensing, 2010, № 2, 833–860. DOI 10.3390/rs2030833.
14. Никольский В. В., Веретельник Д. А., Долгополов Д. В., Мелкий В. А., Верхотуров А. А., Алексеев О. С. Определение положения береговой линии реки Мсты с использованием технологий цифровой аэросъемки и воздушного лазерного сканирования для обеспечения кадастра. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2024. Т. 68. № 2. С. 30–42. DOI 10.30533/GiA-2024-010.
15. Долгополов Д. В., Кузнецов Т. И., Ахундов А. Г., Барышев А. И., Мелкий В. А. Построение трехмерных моделей объектов магистрального трубопровода по данным лазерного сканирования для формирования границы отвода земель. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 4. С. 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130.

REFERENCES

1. Zverev, A. T., Adzhyan, A. A. (2010). Otsenka inzhenerno-geologicheskoy opasnosti obrusheniya gornyx massivov vokrug ozera Sarezskoe (Tsentral'nyy Pamir) [Assessment of the engineering and geological hazard of mountain massif collapse around Lake Sarez (Central Pamir)]. *Izvestia Vuzov. Geodesy And Aerophotosurveying*, 4, 90–93 [in Russian].
2. Bondur, V. G., Chimitdorzhiev, T. N., Dmitriev, A. V., Dagurov, P. N. (2022). Assessment of the Bureya river landslide reactivation using the persistent scatterer interferometry. *Doklady Earth Sciences*, 502, 1–2, 31–36. DOI 10.31857/S2686739722020025 [in Russian].
3. Karpik, A. P., Khoroshilov, V. S., Komissarov, A. V. (2021). Analysis of methods and tools for studying the dynamics of displacement of landslide. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* 26(6), 17–32. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32 [in Russian].
4. Khoroshilov, V. S., Kobeleva, N. N., Noskov, M. F. (2022). Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2), 733–744. DOI 10.22055/JACM.2022.38005.3129.
5. Carter, W., Shrestha, R., Tuell, G., Bloomquist, D., & Sartory, M. (2001). Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography. *Advancing Earth and Space science*, 82(46), 549–555. DOI 10.1029/01EO00321.
6. Takada, Y., Motono, G. (2020). Spatiotemporal behavior of a large-scale landslide at Mt. Onnebetsu-dake, Japan, detected by three L-band SAR satellites. *Earth Planets Space*, 72, 131. DOI 10.1186/s40623-020-01265-4.
7. Kuzevanov, K. I., Pasechnik, E. Yu., Chilinger, L. N. (2021). Operational evaluation of the risk of development of waterflowing for making information in the unified state real estate register using GIS technologies (on the example of the Ob-Tomsk interfluve). *Geoinformatika*, 1, 11–21. DOI 10.47148/1609-364x-2021-1-11-21 [in Russian].
8. Bogoyavlenskiy, V. I., Bogoyavlenskiy, I. V. (2024). Izuchenie vzryvnoy degazatsii Zemli iz kriolitozony arktiki na Bovanenkovskom mestorozhdenii s primeneniem BPLA [Study of explosive degassing of Earth from the Arctic cryolithozone at the Bovanenkovskoye field using UAVs] *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti [Science and Technology in the Gas Industry]*, 1(97), 59–68. Retrieved from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=63499439> (accessed date: 03.10.2025). EDN: YJJMC [in Russian].

9. Bogoyavlenskiy, V. I., Bogoyavlenskiy, I. V., Kishankov, A. V., Kornienko, S. G., Nikonov, R. A., Sizov, O. S. (2023). Increasing the efficiency and environmental safety of the development of oil and gas resources in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate. *Actual Problems of Oil and Gas*, 3(42), 235–263. DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2023-42.art15 [in Russian].
10. Miyagi, T., Ikeda, K., Ishikawa, H., Doan, L., Thanh, Nguyen Kim, Tien, Pham Van, Li, Y., and Zhang, F. (2024). Interpretation and Mapping for the Prediction of Sites at Risk of Landslide Disasters: From Aerial Photography to Detection by DTMs. In Abolmasov, B., et al. *Progress in Landslide Research and Technology*, 3(1) Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-031-55120-8_2.
11. Dolgopолов, 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. DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355, EDN ABWPNH [in Russian].
12. Dolgopолов, D. V., Baborykin, M. Yu., Zhidilyaeva, E. V., Melkiy, V. A. (2022). Application of Air Laser Scanning Technology in Geotechnical Monitoring for Pipeline Transport. *Monitoring. Science and Technologies*, 2(52), 25–34. DOI 10.25714/MNT.2022.52.003, EDN YCMEZK [in Russian].
13. Meng, X., Currit, N. and Zhao, K. (2010) Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2, 833-860. DOI 10.3390/rs2030833.
14. Nikolskiy V. V., Veretelnik, D. A., Dolgopолов, D. V., Melkiy, V. A., Verkhoturov, A. A., Alekseev, O. S. (2024). Determining the coastline position of the Msta river using digital aerial photography and airborne laser scanning technologies to ensure the cadastre. *Izvestia vuzov "Geodesy and aerophotosurveying"*. 68(2): 30–42. DOI 10.30533/GiA-2024-010 [in Russian].
15. Dolgopолов D. V., Kuznetsov T. I., Akhundov A. G., Baryshev A. I., Melkiy V. A. (2025). Three-dimensional geoinformation modeling of main pipeline facilities by laser scanning data to form the boundary of the allotment of land. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]* 30(4), 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130 [in Russian].

Об авторах

Даниил Валентинович Долгополов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

Франц Александрович Шевчик – старший научный сотрудник.

Елизавета Михайловна Макарычева – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.

Вячеслав Анатольевич Мелкий – доктор технических наук, руководитель Центра коллективного пользования.

Author details

Daniil V. Dolgopолов – D. Sc., Leading Researcher.

Frants A. Schevchik – Leading Researcher.

Elizaveta M. Makarycheva – PhD., Leading Researcher.

Vyacheslav A. Melkiy – D. Sc., Leading Researcher, Head of the Collective Use Center.

Получено / Received 09.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 05.11.2025

Принята к публикации / Accepted 11.12.2025