УДК 528.88
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872
Шифр специальности ВАК: 1.6.7
Обзорная статья

К вопросу изучения опасных инженерно-геологических процессов с применением данных дистанционного зондирования земли

Е.Р. Романова[1,2], М.А. Китаева[3], Е.В. Дробинина[3] ✉

[1] Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева Российской академии наук, Россия, г. Москва
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, г. Москва
[3] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, г. Пермь

✉alenadrobinina@yandex.ru

Аннотация. ***Актуальность*** исследования объясняется активным развитием за последние два десятка лет дистанционного зондирования Земли, данные которого на сегодняшний день отличаются достаточным пространственным и временным разрешением для идентификации поверхностных проявлений опасных инженерно-геологических процессов и их мониторинга. ***Цель.*** Изучение качества и полноты открытых данных дистанционного зондирования Земли и их применимости для проведения оценки опасных инженерно-геологических процессов. ***Объекты***. Поверхностные проявления карста, оползни, эрозионный и аккумулятивный процессы, заболачивание и процессы, развивающиеся в области распространения многолетнемерзлых пород. ***Методы.*** Анализ данных дистанционного зонирования Земли. ***Результаты и выводы.*** Изучены существующие методики применения открытых данных дистанционного зондирования Земли, доступные на территории Российской Федерации, в исследовании опасных инженерно-геологических процессов; проанализированы данные дистанционного зондирования Земли. Сделаны выводы, что использование открытых данных дистанционного зондирования Земли для прямой идентификации отдельных карстопроявлений размером менее 30 м весьма проблематично, однако с их помощью можно определить границы карстовых полей. Весьма перспективным для изучения карстового процесса является использование данных спутниковой интерферометрии. Использование открытых данных дистанционного зондирования Земли для целей идентификации оползней и районирования территории по степени оползневой опасности очень эффективно, связано это в первую очередь с большим размером оползневых тел и значительными изменениями абсолютных отметок поверхности земли при активизации процесса, а также с частым нарушением растительного покрова, регистрируемым посредством вегетационных спектральных индексов. Степень подверженности территории эрозионному процессу зачастую определяют с использованием цифровой модели рельефа. Заболачивание определяется по различным спектральным индексам с использованием мультиспектральных снимков, предоставляемых спутниками семейств Landsat и Santinel. При помощи водных индексов можно провести картирование озер различного генезиса, в том числе термокарстового, и оценить динамику изменения их площадей. Применение цифровой модели рельефа ArcticDEM повышает достоверность оценочных построений в силу того, что ее разрешение позволяет проводить крупномасштабные исследования. Таким образом, свободный доступ к открытым данным дистанционного зондирования Земли и инструментарий их обработки дают возможность оперативно и с высокой достоверностью вести оценку опасных инженерно-геологических процессов и их мониторинг.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический снимок, цифровая модель рельефа, геоинформационная система, опасные инженерно-геологические процессы

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00350), https://rscf.ru/project/24-27-00350/.

Для цитирования: Романова Е.Р., Китаева М.А., Дробинина Е.В. К вопросу изучения опасных инженерно-геологических процессов с применением данных дистанционного зондирования земли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 74–94. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872

UDC 528.88
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872
Review article

Application of Earth remote sensing data when studying hazardous geotechnical processes

E.R. Romanova[1,2], M.A. Kitaeva[3], E.V. Drobinina[3] ✉

[1] Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[2] Research University of Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
[3] Perm State University, Perm, Russian Federation

✉alenadrobinina@yandex.ru

Abstract. ***Relevance.*** Active development of Earth remote sensing over the last two decades, the data of which are currently characterized by sufficient spatial and temporal resolution for the identification of surface forms of hazardous geotechnical processes and their monitoring. ***Aim.*** Study of quality and completeness of open remote sensing data and their applicability for assessment of hazardous geotechnical processes. ***Objects.*** Surface karstforms, landslides, erosion and accumulative processes, waterlogging and processes developing in the area of permafrost distribution. ***Methods.*** Analyzing Earth remote sensing data. ***Results and conclusions.*** The authors have studied the existing methods of application of open remote sensing data for the territory of the Russian Federation in the research of hazardous geotechnical processes and analysed the remote sensing data. It was concluded that the use of open remote sensing data for direct identification of individual karst forms with the size less than 30 m is very problematic, but it is possible to determine the boundaries of karst fields. The use of satellite interferometry data is very promising for studying the karst process. The use of open remote sensing data for landslide identification and zoning of the territory according to the level of landslide hazard is very effective. This is due to the large size of landslide bodies and significant changes in absolute land surface elevations during the activation of the process. This is due to the frequent disturbance of vegetation cover, recorded by means of vegetation spectral indices, as well. The erosion is often determined using digital elevation model. Waterlogging is determined by various spectral indices using multispectral imagery provided by Landsat and Santinel satellites. Water indices can be used to map lakes of different genesis, including thermokarst lakes, and to assess the dynamics of changes in their areas. The use of the Arctic digital elevation model increases the reliability of assessment constructions due to the fact that its resolution allows for large-scale studies. Thus, free access to open remote sensing data and tools for their processing make it possible to assess hazardous geotechnical processes and their monitoring promptly and with high reliability.

Keywords: remote sensing of the Earth, space image, digital elevation model, geographic information system, hazardous geotechnical processes

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no. 24-27-00350), https://rscf.ru/project/24-27-00350/.

For citation: Romanova E.R., Kitaeva M.A., Drobinina E.V. Application of Earth remote sensing data when studying hazardous geotechnical processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 74–94. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4872

Введение

В последние десятилетия классические способы космо- и аэрофотосъемки получили толчок в развитии, детальность и периодичность съемки возросла, появились новые технологии получения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), например, радиолокационная интерферометрия и лазерное сканирование. Наряду с ростом областей применения данных ДЗЗ значительно расширился инструментарий и скорость обработки последних. С каждым годом всё больше данных ДЗЗ становятся доступными для открытого просмотра и скачивания. Данные ДЗЗ не остаются без внимания исследователей в области наук о Земле, в частности их используют для идентификации поверхностных проявлений опасных инженерно-геологических процессов в целях мониторинга для безопасной эксплуатации сооружений.

Новейшие данные дистанционного зондирования отличаются большим объемом информации, для их обработки зачастую необходимы специализированные программы, например ENVI – программный продукт, разработанный компанией «Совзонд», включающий в себя набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных ДЗЗ. Для обработки большого количества про-

странственных данных успешно используются геоинформационные системы (ГИС), среди которых, наряду с платными продуктами (например, ArcGIS) существуют многофункциональные комплексы с открытым исходным кодом (QGIS, SAGAGIS). Доступ к данным ДЗЗ и их анализ возможны с применением облачной платформы Google Earth Engine, которая отличается оперативностью за счет использования мощностей Google [1].

Дистанционное изучение геологического объекта, в том числе с применением открытых данных, обладает финансовым и временным преимуществом перед полевыми маршрутными наблюдениями. На этапе планирования полевых работ помогает скорректировать объемы, способствует правильной организации порядка проведения исследований, позволяет определить участки, на которых геологические процессы и явления могут значительно осложнить работу как в процессе изысканий, так и в период эксплуатации, а также помогает расставить правильные акценты в исследовательской деятельности для достижения наилучшего результата с оптимальными временными и ресурсными затратами.

Весьма успешно для дистанционного изучения опасных геологических процессов (ОГП) применяется воздушное лазерное сканирование, результаты которого являются входными данными для автоматизированного дешифрирования и мониторинга, в том числе для обучения этому нейронных сетей с использованием так называемого «геоморфологического образа ОГП» [2–4]. Совмещение аэроизображений с высокодетальной цифровой моделью рельефа значительно повышает качество дешифрирования, позволяет определять качественные и количественные характеристики опасных геологических процессов в целях мониторинга [5]. Наряду с мониторингом данные ДЗЗ позволяют исследовать труднодоступные обширные площади еще неосвоенных территорий и определять перспективные участки для дальнейшего освоения. Свободный доступ к данным и широкий набор инструментов для анализа дают возможность оперативно и с высокой достоверностью давать предварительные качественные и количественные оценки опасных геологических процессов.

Открытые данные дистанционного зондирования Земли на территории Российской Федерации

Результат дистанционного зондирования Земли в цифровой форме представлен в основном растровыми пространственными данными с определенной геопозицией. К основным открытым данным ДЗЗ, которые можно применить для дешифрирования поверхностных проявлений различных инженерно-геологических процессов, можно отнести: аэрокосмические снимки (панхроматические и мультиспектральные), результаты спутниковой радарной интерферометрии и цифровые модели рельефа.

Наиболее распространённым форматом открытых данных ДЗЗ является аэрокосмический снимок – двумерное изображение, полученное в результате съемки, выполненной специальной аппаратурой с воздуха или из космоса [6]. Основными техническими характеристиками такого изображения являются параметры, описывающие чувствительность или точность регистрации различных свойств объектов. Общепринятым является «разрешение» (resolution): пространственное, радиометрическое, временное и спектральное. Также большое значение имеют обзорность, или ширина полосы обзора, и сезонность съемки.

Пространственное разрешение характеризует детальность съемки и обычно измеряется в метрах на пиксель (м/пикс). Пространственное разрешение варьируется от сверхвысокого разрешения (менее 1м/пикс) до очень низкого (250–3000 м/пикс) [7]. При этом размер пикселя является величиной, определяющей возможность прямого дешифрирования (различения) объектов местности по их изображению, на цифровом снимке могут воспроизводиться только те объекты, размер изображения которых в 1,5–2 раза больше пикселя, а для надежного воспроизведения компактного объекта его размер должен быть не менее четырех пикселей; для того чтобы различались с высокой степенью достоверности компактные объекты разной формы, их площадные размеры должны составлять десятки пикселей [8].

Данный факт является определяющим, когда речь идет, например, о дешифрировании поверхностных форм карста, размер которых варьируется в различных пределах. Так, древние карстово-обвальные воронки и котловины с диаметрами от нескольких десятков до сотни метров легко дешифрируются на мультиспектральных спутниковых изображениях Landsat и Sentinel-2. Для дешифрирования карстовых форм размером до первых десятков метров рекомендуется использовать снимки более высокого разрешения, например, с аппаратов «Канопус-В» или «Ресурс-П», распространяемые на коммерческой основе. Мелкие суффозионные формы диаметром первые метры практически не дешифрируются на космических изображениям по-отдельности, однако зачастую они группируются в так называемые поля, и их дешифрирование сводится к поиску специфического рисунка местности.

Радиометрическое (яркостное) разрешение определяется числом уровней (градаций) яркости, регистрируемых датчиком – приемником излуче-

ния, и фактически определяет точность измерения яркости. *Временное разрешение* определяется периодичностью, с которой можно получать изображение выбранного участка земной поверхности одной и той же съемочной системой [7]. Так как опасные инженерно-геологические процессы отличаются динамичностью и временной изменчивостью, данный параметр является весьма важным и интересным с точки зрения ретроспективного анализа, оценки периодичности того или иного явления, мониторинга опасного инженерно-геологического процесса.

Спектральное разрешение определяется шириной спектральных зон (полос, каналов) съемки и измеряется в единицах длины волны, т. е. в нанометрах (нм, 10–9 м) или микрометрах (мкм, 10–6 м). Часто под спектральным разрешением понимается комплексная характеристика, включающая не только ширину, но и конкретный набор спектральных каналов, их количество. Преимущество мультиспектральных снимков в том, что они позволяют использовать различные варианты цветового синтеза для визуального и автоматизированного дешифрирования объектов на земной поверхности. В зависимости от типа исследуемых объектов используются различные комбинации спектральных каналов или спектральные индексы – расчётные величины, являющиеся результатом арифметических операций с каналами. Порой эти комбинации используют последовательно для поэтапного отделения объектов и их свойств [7].

Наиболее известные космические программы с большей библиотекой открытых данных носят названия Landsat и Sentinel. С 1979 г. программой Landsat руководит национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), в рамках программы было запущено 9 спутников, носящих названия Landsat и имеющих номера от 1 до 9. Самый первый из них – Landsat-1 – был запущен в 1972 г., последний – Landsat-9 – запущен 27 сентября 2021 г. На данный момент функционирует только три из них: Landsat-7, 8 и 9. Значительные объемы космической съемки среднего разрешения (30 м/пикс) обеспечиваются спутниками Landsat-5/7/8/9. Спутник Landsat-5 имеет 7 спектральных каналов, панхромотический канал отсутствует, Landsat-7 – 8 каналов, Landsat-8 и 9 – 11 каналов каждый [9].

Sentinel – проект Европейского космического агентства (EKA). В рамках программы запущено две группы спутников. Sentinel-1A и Sentinel-1B были запущены в апреле 2014 и 2016 гг., в начале 2024 г. был анонсирован запуск спутника Sentinel-1C [10]. Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B, запущенные в июне 2015 г. и марте 2017 г., соответственно, проводят оптико-электронную съемку и имеют по 13 каналов. В сентябре 2024 г. успешно прошел анонсированный ранее запуск Sentinel-2C [11]. Спутник Sentinel-2C вышел на смену Sentinel-2A.

Наряду с оптическими космическими изображениями спутники проекта Sentinel-1 поставляют данные, полученные с радиолокационных сенсоров. Спутник проекта Sentinel-1A осуществляет радиолокационную съемку в С-диапазоне (длина волны 5,6 см). До выхода второго аналогичного спутника – Sentinel-1B – предоставлял возможность повторного наблюдения с интервалом в 12 дней, запуск Sentinel-1B позволил сократить время между съемками до 6 дней. Один из режимов съемки радиолокатора спутника Interferometric Wide Swath (IW) – интерферометрический широкозахватный. Эти данные являются исходными для осуществления спутниковой интерферометрии. Спутниковая интерферометрия не позволяет измерять абсолютные значения отметок земной поверхности с необходимой точностью, но дает возможность получать высокоточные данные об относительных деформациях земной поверхности за определенный период времени [12]. Опыт использования радиолокационной интерферометрии в геоморфологии приведен в работе [13]. Авторами составлена таблица, в которую вошло 30 примеров применения метода для изучения таких процессов, как вулканизм, землетрясения, склоновые и криогенные процессы и техногенное воздействие, демонстрирующих преимущества применения спутниковой интерферометрии для изучения изменений на земной поверхности, вызванных геологическими процессами.

Еще одна библиотека космических снимков, представляющая интерес для инженер-геологов – коллекция ESRI World Imagery – картографический сервис космических снимков высокого разрешения (менее 1 м/пикс). Мозаика снимков доступна для просмотра в ГИС. Однако она не предоставляет возможности исследования динамики, так как съемка, доступная для бесплатного использования, проводилась разово, последнее обновление датируется маем 2013 г.

Глобальные цифровые модели рельефа. Цифровая модель рельефа (ЦМР) – Digital Elevation Model (DEM) – это трехмерная модель земной поверхности. Одни модели содержат информацию о высоте только истинного рельефа, другие – с учетом растительности, зданий и прочих объектов жилой и промышленной инфраструктуры. Существует несколько бесплатных глобальных ЦМР, покрывающих весь Земной шар или большую его часть.

Использование ЦМР нашло свое применение в различных областях хозяйственной деятельности в силу доступности данных для качественного и количественного анализа. Так как описание перечислен-

ных ЦМР широко освещается в научной и технической литературе, кроме того в зависимости от сферы применения и целевого назначения исследования разными авторами приводится сравнение этих моделей и возможностей их применения [14–17], ниже приводится лишь краткий обзор наиболее популярных из них: STRM, ASTER, MERIT, ALOS, Copernicus DEM (GLO-30 DEM), FABDEM, ArcticDEM.

Практически все бесплатные модели, доступные для территории Российской Федерации, характеризуются разрешением в среднем 30 м и ниже и наличием артефактов, связанных со зданиями и растительностью. Группа британских исследователей опубликовала статью [18] о новой цифровой модели рельефа – FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) разрешением 30 м, в основе которой лежит цифровая модель рельефа Copernicus DEM, где удалены здания и леса. Авторы работы утверждают, что путем использования машинного обучения ими разработана первая ЦМР без зданий и леса и уменьшена средняя вертикальная ошибка. В данных MERIT DEM, которые представляют собой комбинацию SRTM и ASTER, также устранены ошибки высот, разрешение модели составляет 90 м [16], что весьма осложняет процесс дешифрирования незначительных по размерам проявлений опасных инженерно-геологических процессов. Миссией ALOS японского агентства JAXA наряду с ЦМР разрешения 30 м поставляются данные с высоким разрешением от 2,5–5,0 м (ALOS PRISM (AW3D Standard)) до 12 м (ALOS PALSAR), однако область покрытия весьма ограничена [17]. Ограничение по области покрытия также присуще SRTM, которая покрывает 80 % земной суши (от 56° ю. ш. до 60° с. ш.) [19]. ArcticDEM ЦМР покрывает циркумполярные регионы планеты, получена благодаря работе Полярного геопространственного центра университета Миннесоты и его партнёров, имеет разрешение 2 м для Арктических зон и 8 м – на Антарктику. ArcticDEM построена на основе сотен тысяч отдельных стереоскопических ЦМР, полученных из спутниковых снимков Maxar, включая данные WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3, а также небольшое количество данных GeoEye-1 [20].

ЦМР также различаются периодичностью получения данных, например, данные модели SRTM были получены единоразово в 2000 г. Данные ASTER получены в 2009 г., а в 2011 г. вышла вторая версия ASTER GDEM (GDEM 2) с некоторыми улучшениями и альтиметрической точностью около 17 м [17]. Архивные снимки ALOS PALSAR-1 в открытом доступе доступны на даты с 2006 по 2011 гг. В 2014 г. был запущен ALOS-2 с датчиком PALSAR-2, время повторного обращения которого составило 14 дней. Бесплатный доступ к данным ALOS PALSAR-2 ограничен, предоставляются на коммерческой основе. Данные Copernicus DEM характеризуются временным покрытием 2010–2015 гг.

Следует иметь в виду, что для большинства глобальных ЦМР есть ограничения при их использовании для залесенных и застроенных территорий: данные на таких участках содержат погрешность, обусловленную высотой деревьев и зданий. Также ЦМР могут содержать ошибочные значения и артефакты, которые можно поделить на «приемники» (понижения, «ямы», отрицательные выбросы) и пики (возвышенности, положительные выбросы) [21, 22].

Мировой опыт использования открытых данных дистанционного зондирования Земли для изучения поверхностных проявлений опасных инженерно-геологических процессов

Карстовый и суффозионный процессы. Практически все специальные карстологические исследования начинаются с изучения распределения поверхностных форм проявления карста. Для успешного дешифрирования карстовых и карстово-суффозионных форм на аэро- и космоснимках их размер должен составлять не менее 4–5 пикселей. Так как разрешение открытых космических данных в большинстве составляет 10 м и более на пиксель (среднемасштабные снимки), то достоверная идентификация по этим снимкам объектов карстового и карстово-суффозионного генезиса размером менее 40–50 м не представляется возможной. Мелкие карстовые воронки в условиях открытого или покрытого карста, где мощность покровов незначительна, а также формы суффозионной природы – воронкообразные понижения в рельефе диаметром от первых метров до 10–15 м – на таких снимках по отдельности не дешифрируются, однако возможно выделение карстовых полей – специфических форм рельефа, называемых «гусиная кожа» за специфический морфологический рисунок на космоснимках [23].

На рис. 1 представлены спутниковые изображения различного пространственного разрешения для закарстованного участка около г. Уфы. Минимальный диаметр воронок, развитых на участке, составляет 13 м, максимальный – около 75 м. Несмотря на то, что практически все формы выделяются на изображении Sentinel-2A (рис. 1, *б*), с уверенностью все назвать карстовыми воронками сложно. На космическом изображении Google данные формы выделяются отчетливо и их дешифрирование не составляет особых сложностей (рис. 1, *а*).

По этой причине спектральные космоснимки Sentinel-2 можно использовать лишь для определения контура полей поверхностных проявлений, для детального изучения пораженности территории

карстовым процессом они не подходят. Также стоит учитывать ограничения, которые накладываются на такой формат исходных данных, их использование на залесенных территориях возможно только в комплексе с другими методами или после предварительного спектрального анализа. В связи с этим исследования отдельных карстопроявлений с использованием открытых глобальных (доступных на весь Земной шар) библиотек данных ДЗЗ являются скорее исключением, чем правилом.

Рис. 1. *Поле карстовых понижений около г. Уфы: а) снимок высокого разрешения Google (Maxar, май 2023 г.); б) снимок с спутника Sentinel-2A (18 мая 2023 г.)*

Fig. 1. *Field of karst depressions near Ufa: a) high-resolution Google image (Maxar, May 2023); б) Sentinel-2A satellite image (18 May 2023)*

В качестве примера стоит упомянуть работу зарубежного исследователя, посвященную анализу применимости открытых данных дистанционного зондирования Земли в карстологических целях, которая освещает возможность применения оптических спутниковых данных (Landsat, Sentinel-2), радиолокационных изображений (Sentinel-1, ALOS PALSAR) и данных ЦМР (SRTM, ASTER, ALOS PALSAR) для обнаружения карстовых поверхностных форм на примере территории Ливана. В результате своего исследования автор приходит к выводу, что разрешение используемых ЦМР (30 и 12,5 м) достаточно для обнаружения крупных и глубоких понижений рельефа, но непригодно для обнаружения мелких воронок и впадин. Для более детального исследования территории необходимо построение ЦМР высокого разрешения, например, по данным лидарной съемки [24].

Дешифрирование панхроматических аэрокосмоснимков является довольно старым методом. Однако многоканальные аэрокосмоснимки, ЦМР и данные спутниковой интерферометрии – достаточно новый формат данных дистанционного изучения для геологического научного общества. Методика их анализа в карстологических целях находится на стадии разработки – существует огромное количество работ, посвященных дистанционному анализу закарстованных территорий. Например, группа зарубежных исследователей разработали методику автоматизированной идентификации замкнутых понижений рельефа в провинции Гуйчжоу (Китай) на ЦМР ALOS PALSAR с разрешением 12,5 м в ГИС. Эффективность алгоритма оцифровки понижений определялась с помощью топографических данных, полевых исследований и спутниковых снимков Landsat-8 и Google Earth. Результаты верификации модели двумя группами, подтвердившими 75 и ~90 % выделенных алгоритмом форм, соответственно, позволили сделать вывод о высокой точности разработанной методики [25].

Полякова Е.В. с соавторами использовали ЦМР ASTER для оценки предрасположенности территории Архангельской области к развитию карстовых процессов посредством поиска бессточных впадин, которые могут являться замкнутыми понижениями рельефа, связанными с карстом. Так как в силу разрешения модели выделение отдельных карстовых форм не представляется возможным, авторами построена карта плотности бессточных впадин и отмечено пространственное совпадение субмеридионально вытянутой зоны повышенной плотности бессточных впадин с выходом карстующихся пород [21].

Как было сказано раннее, судить об относительных изменениях уровня земной поверхности можно посредством радарной интерферометрии, по этой причине данные с семейства спутников Sentinel-1 нашли свое применением для идентификации активных проявлений карста. Ретроспективный анализ радарных данных за несколько лет позволил ряду зарубежных исследователей выявить зоны оседания, предшествующие образованию провалов в окрестностях деревни Кердабад в провинции Хамадан (Иран) в 2015 г. [26], в городе Центурион провинции Гаутенг Южно-Африканской Республики в 2017 г. [27]. В работе [28] авторы при помощи данных с спутника Sentinel-1 исследовали деформации поверхности вблизи уже существующих провалов в штате Техас (США), выявлено, что область около одного из исследуемых провалов опускается со скоростью 13 см/год.

В другом исследовании [29] использованы карты смещения земной поверхности, построенные по

данным спутника Sentinel-1 для изучения взаимосвязи между изменениями уровня поверхности земли, откачкой грунтовых вод для целей орошения и провалообразованием на территории региона Карапынар (Турция). Это далеко не полный список исследований, использующих данные радарной съемки Sentinel-1 в изучении закарстованных территорий. Эти исследования показывают, что использование данных радарной съемки и результатов их интерферометрической обработки могут быть весьма полезными в наблюдении за процессом подготовки провалообразования посредством регистрации относительных смещений земной поверхности на протяжении некоторого времени. Такой методический подход является весьма перспективным для оценки опасности закарстованных территорий. Однако нужно иметь в виду, что обработка таких данных является технически сложной задачей, требующей специализированного программного обеспечения и навыков работы с ним.

Для повышения достоверности прогнозных оценок рекомендуется комплексирование анализа данных ДЗЗ с другими методами карстологического изучения. Например, в зарубежном исследовании авторы использовали данные ДЗЗ ЦМР ASTER и мультиспектральные снимки со спутника Sentinel-2 для объединения их с геофизическими данными для оценки карстового риска на территории города Эль-Хаджеб (средний Атлас, Марокко) [30].

Интенсивное развитие методов машинного обучения и их внедрение в различные сферы жизни нашло отражение и в области анализа данных ДЗЗ в карстологических целях. Так, рядом исследователей предложена новая глубокая структура обучения SinkholeNet для классификации и идентификации карстовых воронок с использованием снимков RGB и карт уклонов местности высокого разрешения [31]. Предложенная авторами модель извлекает признаки из входного RGB-изображения и карты уклона местности, а затем объединяет извлеченные признаки и производит классификацию изображения: воронки или неворонки. Предложенная авторами интеграция спутниковых данных с картой уклонов местности значительно повышает точность классификации и локализации карстовых форм. Еще одним преимуществом модели является использование техники слабого контроля, основанной на генерации тепловых карт, что облегчает идентификацию так называемых «карстовых полей» для классификации скопления воронок.

Сравнивая разработанную модель с десятью другими подобными, авторы получили наивысшие показатели по всем пяти анализируемым критериям сравнения моделей, рассчитанным на основе количества ложноотрицательных (false negative – FN), ложноположительных (false positive – FP), истинно отрицательных (true negative – TN) и истинно положительных результатов (true positive – TP):

- достоверность (accuracy) – процент правильного обнаружения в целом;
- чувствительность (sensitivity) – процент правильно выделенных областей «неворонок» (TN) по отношению ко всем достоверным воронкам (TP+FN);
- избирательность (specificity) – процент правильно выделенных областей «неворонок» (TN) к общему числу таких областей (TN+FP);
- точность (precision) – процент правильного обнаружения воронок (TP) ко всем обнаруженным воронкам (TP+FP);
- отзывчивость (recall) – процент правильного обнаружения воронок (TP) ко всем достоверным воронкам (TP+FN) [31].

Таким образом, данные ДЗЗ нашли успешное применение в карстологических исследованиях, причем не только на уровне визуального анализа космических изображений с целью дешифрирования карстовых форм, но и посредством обработки данных космической съемки, в том числе с успешной автоматизаций процесса обработки.

Оползневой процесс. При натурных наблюдениях к визуальным признакам проявления оползневых процессов можно отнести: трещины, плоскости отрыва, валы, образующиеся у подножья склона, оползневые уступы, большое число водопроявлений и заболоченность, деформации сооружений, находящихся в зоне влияния процесса и т. п. [32]. Дешифровочные признаки оползневого процесса по космическим снимкам различной детальности определены уже давно [33] и успешно применяются и сейчас. В связи с большими площадями оползневых тел, разрушительностью процесса схода оползня и очевидной опасностью для жизни и здоровья людей оползневые и потенциально оползневые участки часто становятся объектами изучения исследователей, а масштаб проявления позволяет их изучать при помощи открытых данных ДЗЗ доступного на сегодняшний день разрешения с высокой достоверностью и эффективностью.

С применением цифровой модели рельефа SRTM, космоснимков Landsat-5,7,8, GeoEye-1 за разные периоды наряду с региональными топографическими и ландшафтными картами, данными микроклиматических исследований, полевыми исследованиями особенностей растительного и почвенного покрова О.В. Безгодовой и др. выполнен комплексный ландшафтно-морфометрический анализ Мондинской котловины. Результатом анализа стала карта зонирования территории по степени оползневой и селевой опасности (условно по геоморфологическим параметрам, степени задернованности в комплексе с натурными наблюдениями) [34].

Другими исследователями применены данные ДЗЗ для ретроспективного анализа оползневого процесса на берегу р. Буреи. Целью работы выступило выявление причин и времени активизации схода оползневого тела. Авторами проанализирована интерферометрическая съемка, полученная с помощью космических радаров L-диапазона PALSAR-1 и PALSAR-2 спутников ALOS-1 и ALOS-2 (данные запрошены у японского аэрокосмического агентства). Сравнительный анализ результатов радарной съемки позволил не только установить временной период и причину схода оползня, но и сделать вывод о том, что наиболее информативны зимние снимки, что объясняется снижением когерентности (согласованности волн) дождевыми осадками и нестабильностью диэлектрических свойств растений в летний период [35].

Еще одним примером использования методов радарной интерферометрии служит работа [36], в которой на участке Сочи–Адлер выявлены территории, подверженные оползневым процессам, по космоснимкам со спутников Sentinel-1 с нисходящих и восходящих орбит за трехлетний период. Полученные в результате работ карты позволили оценить динамику смещения оползневых тел; использование разноорбитных снимков дало возможность наиболее точно оконтурить области активизации деформации, а применение серии снимков – выделить период активизации сползания массы пород [36].

Следует упомянуть о прогрессе Китайских ученых в области использования данных ДЗЗ, в частности радарной интерферометрии, для изучения оползневых участков [37]. Китайскими ученными рассмотрены три основные технологии дистанционного исследования оползней: радары с синтезированной апертурой SAR (состоящей из InSAR и GBSAR), оптический (космический и воздушный) и лазерный сканеры. Благодаря широкому покрытию InSAR широко используется для отслеживания и анализа смещений до обрушения и выявления активных оползней регионального масштаба. Основное применение космического оптического дистанционного зондирования заключается в быстром картировании оползневых процессов и ретроспективном анализе эволюции оползней. Оптическое воздушное и лазерное дистанционное зондирование обеспечивают сверхвысокоточные наблюдения, подходящие для мониторинга и интерпретации оползней. Результатом применения этой технологии служит также дополнительная информация, такая как многовременные цифровые модели поверхности, детальные карты микрорельефа и смещения поверхности.

Высокую достоверность результатов радарной интерферометрии по данным со спутника Sentinel-1 подтверждает работа [38], где авторы исследовали 32 случая схода оползневых тел в различных странах мира и сделали вывод, что в 84 % случаев оползневые тела можно однозначно идентифицировать по результатам радарной интерферометрии, и лишь в 13 % случаев доказательства схождения оползня по данным ДЗЗ отсутствуют. Данные интерферометрии из открытых источников были использованы при исследовании территории Чили и Мьянмы [39], на территории острова Хоккайдо (Япония) [40]. В [13] авторы привели пять примеров исследования оползневых процессов в Италии, Китае, Перу и в Амурской области в России с использованием данных радарной интерферометрии.

В работе [41] представлены результаты двухлетнего мониторинга опасных экзогенных геологических процессов (ОЭГП) (оползневых, эрозионных, термокарстовых, заболачивания и подтопления и т. д.) по данным дистанционного зондирования, где наряду с открытыми данными использованы: оперативная съемка, выполненная спутником GeoEye-1 с разрешением 0,5 м (панхроматический канал) и 2,0 м (мультиспектральные каналы), архивные материалы Digital Globe со спутников WorldView-1, QuickBird-1 и др., цветная (в RGB диапазоне) цифровая маршрутная аэрофотосъемка в режиме кадровой съемки. Такой подход позволил авторам значительно повысить достоверность анализа и качество результатов. Так, авторами в первый год мониторинга оконтурены участки, на которых развиты ОЭГП, во второй год выполнено детальное исследование территорий, подверженных процессам и составлены карты их развития. С использованием космосников, ЦМР и фондовых карт распространения многолетней мерзлоты авторами сопоставлено влияние двух факторов (рельефа и многолетней мерзлоты) на развитие ОЭГП (линейной эрозия, заболачивание, термокарстовые процессы) на изучаемой территории.

Еще одним примером успешного применения данных ДЗЗ для исследования оползневого процесса может служить работа [42]. Так, авторы выполнили картирование оползневого процесса в два этапа. На первом этапе определили дискриминантную функцию, получаемую путем измерения изменений, произошедших между изображением до и после оползневого события, с использованием трех различных показателей: изменения значений индекса состояния растительности (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), изменения значений спектрального угла SA (угол между двумя спектральным поверхностями до и после события) и результатов анализа методом главных компонентов (PCA, линейное преобразование ряда потенциально коррелирующихся переменных в ряд некоррелированных переменных в другой ортого-

нальной системе с осями, ориентированными по направлениям наибольшей дисперсии). Анализируемые показатели представлены в виде одного набора растровых изображений. На втором этапе выполнено ранжирование территории на области, не подверженные и подверженные оползневому процессу, по нескольким пороговым значениям анализируемых показателей. Использование нескольких показателей, вместо одного позволило минимизировать ошибки разработанной модели. Результаты апробации предложенной модели приведены в работе [43], где для территории Мьянмы по двум спутниковым изображениям RapidEye с разрешением 5 м до и после события проведено ранжирование территории на области, не подверженные и подверженные оползневому процессу. Для расчета дискретной функции использована ЦМР ASTER.

Эрозионный и аккумулятивный процессы. В качестве примеров применения ЦМР для изучения эрозионных процессов можно привести работы [44–48], в которых использованы разные параметры и разные показатели для оценки эрозионной опасности. Используя ЦМР SRTM, А.В. Федоров и др. выбрали в качестве оценочных параметров уклоны поверхности, характеризующие скорость движения водных и грунтовых масс по склону, вертикальную и горизонтальную расчлененности [44]. Н.И. Гайворонской в дополнение к вышеупомянутым показателям использована также экспозиция склона – его ориентация по сторонам света [45]. Ю.Н. Дуброва и др. оценили эрозию по следующим расчетным параметрам: индексу мощности линейной эрозии (Stream Power Index – SPI), фактору эрозионного потенциала рельефа (Length Steepness Factor – LSF), топографическому индексу влажности (Topographic Wetness Index – TWI), индексу устойчивости местности (Terrain Ruggedness Index – TRI) [46, 47].

Индекс TWI позволяет выделить территории, которые могут быть подвержены переувлажнению, что объясняется благоприятными геоморфологическими особенностями для концентрации поверхностного стока. Индекс SPI показывает: чем выше значения водосборной площади и угла уклона местности, тем более подвержена территория распространению процессов разрушения горных пород поверхностными водами. Индекс LSF характеризует влияние рельефа на процессы плоскостной эрозии. Индекс устойчивости местности TRI – это показатель, описывающий энергию потока, скорость стока, выражается через перепад высот между соседними ячейками ЦМР [46, 47]. Пример использования ЦМР FABDEM с разрешением 30 м в исследовании эрозионного и карстового процессов на Пивоваровском карстовом участке приведен в [49].

В зарубежной литературе под словом «эрозия» понимается уменьшение объема грунта вследствие действия поверхностных вод, ветра и даже деятельности человека, и для определения количества потерь грунта и составления карт опасности используются мультиспектральные аэрокосмоснимки. Например, рядом исследователей по коллекции снимков спутников Landsat-7 и Landsat-8 во временном интервале с 2010 по 2020 гг. определен спектральный индекс BSI (Bare Soil Index), который потом использован для получения коэффициента степени эрозии на примере территории в Боснии и Герцеговине [50].

Расчет спектральных индексов – хороший инструмент анализа данных ДЗЗ, позволяющий следить за динамикой руслового процесса. В целях данного исследования на участке впадения р. Оби в Обскую Губу авторами рассчитан нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index – NDWI) по данным спутника Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Instrument, Level-2A – данные с проведенной атмосферной коррекцией) на 12 июля 2017 г. и 26 августа 2024 г. (рис. 2).

Используя полученные изображения, авторы смогли выделить маску водного объекта на обе изучаемые даты. В результате бинаризации растра с последующей векторизацией изучена динамика изменения береговой линии реки и сделан вывод, что использование мультиспектральных изображений позволяет с высокой достоверностью оконтурить водные объекты на заданную дату и наблюдать за изменением береговой линии. Повысить точность оценочных суждений можно благодаря использованию наблюдений за более длительный период времени.

Кроме эрозионного, мультиспектральные изображения используются для изучения абразионного процесса [51]. Например, снимки со спутников Landsat за 1980, 1990, 2000, 2010 и 2023 гг. использованы зарубежными исследователями для определения абразии морской береговой линии в регионе Розетта (Египет), где по пяти снимкам определены границы береговой линии и оценены такие показатели абразии, как:

- Net Shoreline Movement (NSM) – расстояние, на которое сместилась береговая линия за изучаемое время;
- End Point Rate (EPR) – скорость смещения береговой линии – отношение расстояния, на которое сместилась береговая линии, и временного интервала этого смещения;
- Shoreline Change Envelope (SCE) – самое длинное среди расстояний, на которое сместилась береговая линия за изучаемый период;
- Linear Regression Rate (LRR) – скорость линейной регрессии, построенной на основе данных о расстоянии береговой линии от базиса и времени.

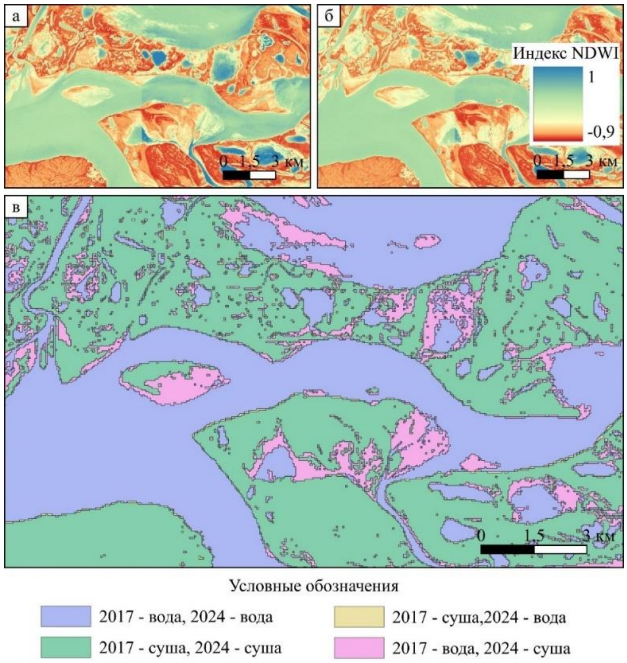

Рис. 2. *Изменение береговой линии участка впадения р. Оби в Обскую Губу: а) индекс NDWI (Sentinel-2A, 12 июля 2017 г.); б) индекс NDWI (Sentinel-2A, 26 августа 2024 г.); в) карта районирования территории*

Fig. 2. *Changes in the shoreline of the Ob River confluence into Ob Bay: а) NDWI index (Sentinel-2A, 12 July 2017); б) NDWI index (Sentinel-2A, 26 August 2024); в) zoning map of the territory*

Заболачивание. Как уже было сказано, для идентификации некоторых объектов используются различные комбинации спектральных каналов космических снимков или расчетные индексы – результаты алгебраических выражений с каналами. Болота отличаются повышенной влажностью почвы и, следовательно, типом растительности, что и используют исследователи для картирования заболоченных территорий.

Небольшая часть работы [52] посвящена дешифрированию и типизации болот на территории Томской области, в пределах Бакчарского и Иксинского болот, по методу аналогии. Исходным материалом послужили космические снимки Landsat-7, которые характеризуются наличием шести спектральных каналов, инфракрасного канала и панхроматического изображения. В работе использованы 5 спектральных каналов с разрешение 30 м. С помощью инструментов системы ERDAS Imagine созданы обучаемые эталоны по полевым данным и выполнена автоматическая классификация болотных ландшафтов по особенностям растительного покрова, после проведена коррекция, генерализация карты путем фильтрации результатов с выбором преобладающего класса методом скользящего окна 3×3 пиксела. По результатам обработки космоснимков территория разделена на болота с ранжированием по характерной растительности, на леса и прочие территории. Подобный спектральный анализ космоснимка RapidEye с разрешением 6,5 м в программном комплексе ENVI выполнен для территории левого берега р. Оби с целью картографирования болотных микроландшафтов [53]. В работе задействованы 4 спектральных канала и 1 инфракрасный. Спектральная классификация проведена по данным инженерно-экологических изысканий. Для оконтуривания территории болотных ландшафтов, леса, водной поверхности, антропогенно-преобразованной территории использованы зеленый, длинноволновый красный, инфракрасный каналы и вегетационный индекс NDVI (характеризующий состояние растительности, рассчитываемый по данных в красном и ближнем инфракрасном диапазонах) [54].

Другой подход к картографированию заболоченных территорий применен А.А. Казаковым на примере Тарманского болотного массива [55]. По космоснимкам Landsat-4,5,7 в программном комплексе ENVI выполнена конвертация данных с радиометра TM (Landsat 4) по каналу номер 6 с разрешением 120 м, с радиометра ETM (Landsat-5,7) по каналам 6_1 и 6_2 с разрешением 60 м в значения температуры. В результате получено растровое изображение, по которому можно картографировать болота, опираясь на различие термических режимов торфяных и минеральных почв.

С помощью спектральных индексов и различной комбинации каналов мультиспектрального изображения в рамках данного исследования авторами оценена территория Московской области рядом с Кубринским водохранилищем, где расположено Батьковское болото (рис. 3).

Так, в результате расчета нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и представления изображения в красном, инфракрасном и видимом диапазонах можно сделать вывод, что хорошо границу болота и леса показывает изображение в красном диапазоне (рис. 3, *г*): значение канала B4 (красный диапазон) в границах болота превышает 0,02, в то время как на лесной территории эти значения составляют 0,0020–0,0019. Значение индекса NDVI в границах заболоченной территории составляет 0,70–0,85. Спектральный анализ космического изображения позволяет подчеркнуть детали, которые в видимом диапазоне улавливаются слабо, и на основании этого скорректировать границу проявления опасного инженерно-геологического процесса.

Процессы и явления, развивающиеся в области распространения многолетнемерзлых пород. В данном разделе рассматривается опыт использования открытых данных ДДЗ для идентификации процессов и явлений, характерных для территорий

развития многолетнемерзлых пород: образования термокарстовых озер, бугров пучения, наледей, развития трещинно-жильных льдов, картирования мерзлых грунтов.

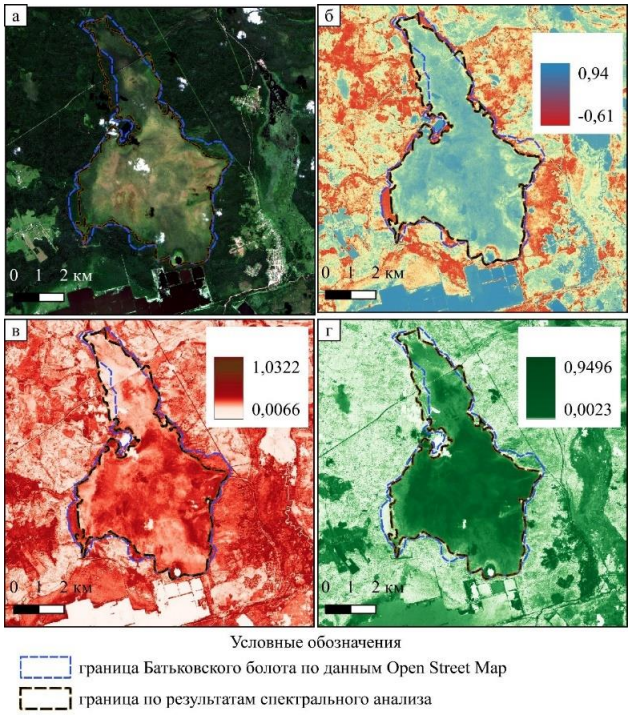

Рис. 3. *Космический снимок Батьковского болота (Московская область) Sentinel-2A 17 июля 2024 г.: а) в натуральном цвете (комбинация RGB); б) индекс NDVI; в) NIR (B8, ближний инфракрасный диапазон); г) RED (B4, красный диапазон)*

Fig. 3. *Space image of the Batkovskoe bog (Moscow region) Sentinel-2A satellite on July 17, 2024: a) in natural colour (RGB combination); б) NDVI index; в) NIR (B8, near infrared range); г) RED (B4, red range)*

Из-за ограниченного развития территорий с многолетнемерзлыми грунтами количество исследовательских работ не так велико, но это не означает, что изучение этих процессов и явлений менее важно, чем рассмотренных раннее процессов, скорее наоборот. Специфику в исследование этих областей вносит необходимость их изучения в связи с промышленным освоением северных территорий. Области распространения многолетнемерзлых пород зачастую наиболее труднодоступны для проведения маршрутных наблюдений и сильно удалены от населенных пунктов, по этим причинам предварительное исследование участка планируемых работ очень важно, и открытые данные ДЗЗ могут значительно облегчить эту задачу.

В работе [56] продемонстрирован результат визуального дешифрирования термокарстовых озер Большеземельской тундры по снимкам Канопус-В с разрешением 2 м. В работе выбраны снимки, сделанные в период с июня по август, с целью минимизации влияния колебания уровня воды, а также в связи с тем, что в летний период прослеживается отсутствие ледяного покрова на водоемах. Используя функциональные возможности геоинформационной системы ArcGIS, авторы оценили извилистость береговой линии для более точного определения площади озер. В работе отечественных исследователей изучено изменение площадей термокарстовых озер на двух участках, расположенных в южной части территории Ямало-Ненецкого автономного округа: первый находится в геоботанической подзоне северной тайги и в южной зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, второй – в подзоне лесотундры и в центральной части зоны прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Для первого участка по серии снимков спутников Landsat, Ресурса-Ф2 и Spot-5 в интервале с 1973 по 2005 гг. оценивалось изменение площади 40 термокарстовых озер. Для второго по серии снимков спутников Landsat с 1984 по 2001 гг. оценено изменение площади 91 термокарстового озера. В результате исследования авторами сделан вывод об уменьшении площади озер на обоих исследуемых участках [57].

Американские исследователи проанализировали динамику исчезновения термокарстовых озер Сибири по космоснимкам, полученным за семилетний период [58]. Шведские исследователи применили космоснимки Landsat, полученные с помощью многоспектрального сканера MSS, с разрешением 60 м, и датчика TM – с разрешением 30 м. Авторы выбрали данные за три временных интервала (1973, 1987–1988 и 2007–2009 гг.) для сопоставления изменений площади термокарстовых озер Западной Сибири [59]. Аналогичную работу выполнили отечественные исследователи по снимкам Landsat-1 (сканер MSS), Landsat-5 (сканер MSS), Ресурс-Ф2 (камера МК 4), Landsat-7, Spot-5. Изменения площадей озер оценивалось с помощью программного средства ERDAS Imagine [60]. Разумеется, для повышения достоверности площадной оценки динамики термокарстового процесса рекомендуется использовать снимки с высоким разрешением. Так, Ю.М. Полищук, А.Н. Богданов отмечают, что для дешифрирования озер малых размеров более информативны космоснимки Канопус-В, чем Landsat [61].

Для оценки динамики термокарстовых озер как индикаторов изменения геокриологических условий на территории полуострова Ямал в целях данного исследования с использованием мультиспектральных космоснимков Sentinel-2A на разные даты (24.07.2017 г., 23.07.2024 г.) рассчитан индекс NDWI и проведен анализ ЦМР. С использованием индекса NDWI определены положение, конфигура-

ция и площадь водоемов. На рис. 4 представлена территория размером 7750×5150 м. По данным на июль 2017 г. на ней находилось 87 озер площадью от 2,5 до 0,42 км^2. К 2024 г. количество независимых друг от друга водоемов уменьшилось до 82. При этом суммарная площадь поверхности, покрытой водой, в 2017 г. составляла 3,23 км^2, к 2024 г. она составила 3,27 км^2. Несмотря на это 49 озер пересохло, а оставшиеся 38 озер превратились в 73 новых независимых водоема площадью от 31,3 до 0,43 км^2, а также появилось 9 новых озер площадью 5 до 622 м^2.

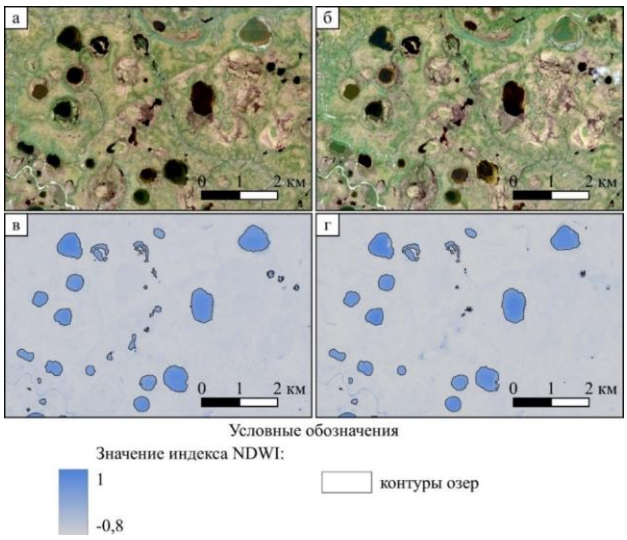

Рис. 4. *Термокарстовые озера полуострова Ямал: а) снимок Sentinel-2A 24.07.2017 г.; б) снимок Sentinel-2A 23.07.2024 г.; в) индекс NDWI и контуры озер на 24.07.2017 г.; г) индекс NDWI и контуры озер на 23.07.2024 г.*

Fig. 4. *Thermokarst lakes of the Yamal Peninsula: a) Sentinel-2A image 24.07.2017; б) Sentinel-2A image 23.07.2024; в) NDWI index and lake contours on 24.07.2017; г) NDWI index and lake contours on 23.07.2024*

На рис. 5 представлен фрагмент исследованной территории. Из открытых официальных источников авторами была получена ЦМР ArcticDEM с разрешением 2 м/пикс (рис. 5, *б*) и при помощи ГИС построена карта крутизны поверхности (в градусах). Использование вместе с спутниковыми мультиспектральными снимками ЦМР более высокого разрешения позволяет не только выделить участки, покрытые водой, но и определить истинные границы термокарстовых понижений.

В отличие от термокарстовых озер, размеры которых в плане изменяются в очень широких пределах, размеры бугров пучения (БП) значительно меньше, поэтому их сложнее идентифицировать по снимкам с разрешением 30 м/пиксель или по ЦМР аналогичного разрешения. Наиболее подходящими для решения этого вопроса можно считать данные, предоставляемые ЦМР ArcticDEM, с разрешением до 2 м/пикс. Модель ArcticDEM охватывает всю территорию Арктики, имея в своей основе множество космоснимков высокого разрешения. В работе [62] описан алгоритм оцифровки многолетних БП по ЦМР, который позволяет сформировать набор топологических свойств из входной матрицы точек ЦМР и проводить их дальнейший анализ с последующей фильтрацией по заданным параметрам. Авторы проверили эффективность алгоритма на пяти участках размером 25*25 тыс. пикс. и оценили процент правильного выделения БП только по геометрическим параметрам и по геометрическим параметрам и топологическим признакам совместно. Использование алгоритма для выделения БП по геометрическим параметрам и топологическим признакам повысило процент правильного выделения БП на 3,6 % (с 78,2 до 81,8 %).

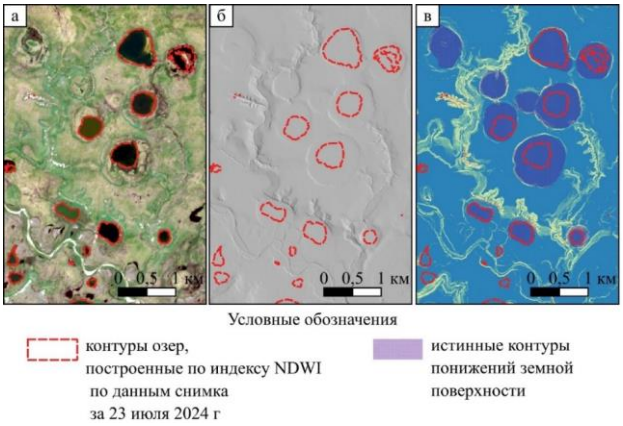

Рис. 5. *Контуры термокарстовых понижений по данным: а) Sentinel-2A 23.07.2024; б) ArcticDEM в отображении «теневой рельеф»; в) карты уклонов земной поверхности*

Fig. 5. *Contours of thermokarst depressions according to the data: a) Sentinel-2A 23.07.2024; б) ArcticDEM in the «shadow relief» image; в) maps of land surface slopes*

По своей сути картографирование бугров пучения очень похоже на картографирование карстовых и суффозионных локальных понижений. При поиске проявлений карста следует искать локальные понижения, т. е. пиксель или группу пикселей, вокруг которых абсолютные отметки больше, а при поиске бугров производится поиск пикселя или группы пикселей, вокруг которых расположены пиксели с меньшими абсолютными отметками.

Так, с целью демонстрации применимости ЦМР для дешифрирования бугров пучения в данной работе исследован участок около р. Проточной на

территории Лебединого заказника (юг Чукотского автономного округа). На рис. 6 показаны 4 бугра пучения, высота которых изменяется от 3,5 до 17,2 м, а диаметр – 115–170 м. Формы довольно сложно дешифрируются по снимку ESRI World Imagery, однако хорошо видны на ЦМР ArcticDEM.

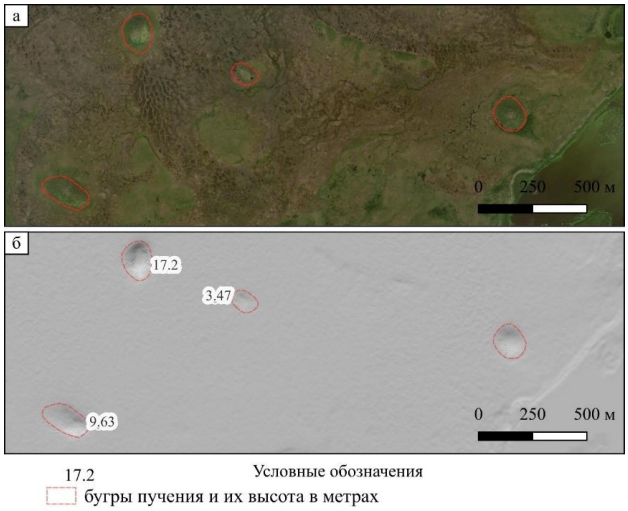

Рис. 6. *Бугры пучения по данным: а) ESRI World Imagery; б) ArcticDEM в отображении «теневой рельеф»*

Fig. 6. *Swelling bumps according to: a) ESRI World Imagery; б) ArcticDEM in the «shadow relief» display*

Еще одним явлением в области распространения многолетнемерзлых пород, значительно осложняющим инженерную деятельность, являются наледи. Для картографирования наледей хорошо подходят космические снимки Sentinel-1, Sentinel-2. В отечественном исследовании проведено картографирование наледей на территории Чульминского плато (южная Якутия) двумя способами: первый – с применением разностного снежного индекса – NDSI, второй – с помощью поляриметрического разложения радиосигнала на основе радарных космоснимков. Для расчета NDSI были использованы снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-2Ac атмосферной коррекцией. Всего было использовано пять снимков с датой съемки май 2018–2022 гг. Пороговое значение индекса NDSI, позволяющее оконтурить наледи, составило более 0,4. В качестве исходных данных для реализации второго способа картографирования использованы радарные изображения спутников Sentinel-1. В работе были рассчитаны площади наледей, закартографированных обоими методами; было идентифицировано 237 наледей; сделан вывод, что количество последних менялось из года в год. Суммарная максимальная площадь всех наледей за 2018–2022 гг. составила 134,44 км^2. При этом коэффициент детерминации площадей наледей по двум методам (R^2) низкий – 0,16–0,37. Это связано, во-первых, с тем, что алгоритм разложения неполно поляризационного радиолокационного снимка ведет к завышению площадей наледей, и, во-вторых, с тем, что использовались мультиспектральные и радарные изображения, полученные с небольшой разницей времени съемки [63].

Для того чтобы оценить динамику изменения размеров Момской наледи в весенне-летний период, в данной работе рассчитан спектральный снежный индекс NDSI для 10 снимков, сделанных спутником Sentinel-2 в интервале с 25 мая по 16 августа 2024 г. Наледь располагается в восточной части Республики Саха, ее длина более 25 км, является самой большой на территории Российской Федерации.

На рис. 7 показано изменение площади наледи. Для количественной оценки на рис. 8 представлен график изменения площади: 25 мая 2024 г. площадь наледи составляла 55,35 км^2, была минимальна 12 июля 2024 г., при этом в трехдневный период с 9 по 12 июля 2024 г. ее площадь сократилась с 24,08 до 7,37 км^2, затем к 15 июля 2024 г. увеличилась до 16,20 км^2, после чего ее значение резко не менялось, колеблясь в пределах 3–5 км^2.

В районах развития многолетнемерзлых пород с помощью ДДЗ можно выделять участки развития трещинно-жильных льдов, что представлено в работе [41].

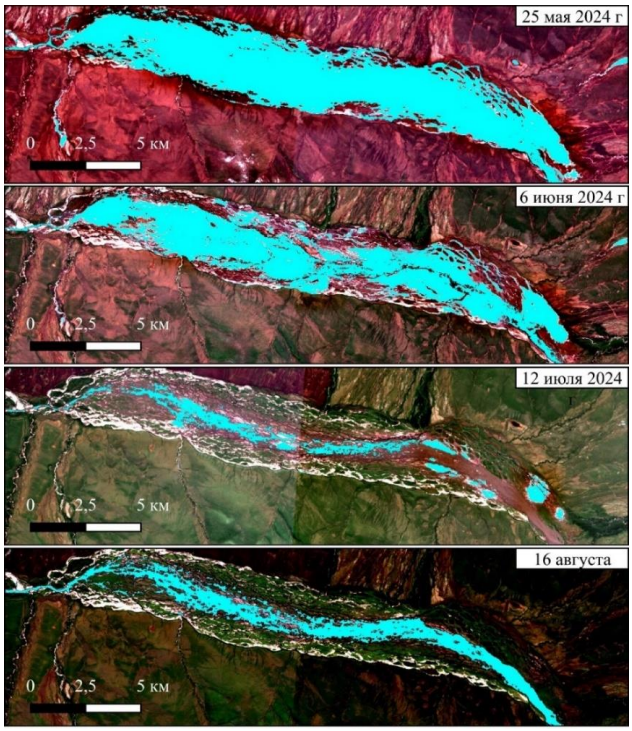

Рис. 7. *Изменение Момской надели с 25 мая по 16 августа 2024 г.*

Fig. 7. *Change of the Moma ice sheet from 25 May to 16 August 2024*

Таблица. *Сводная таблица оценки применимости отдельных видов данных ДЗЗ для изучения проявлений опасных инженерно-геологических процессов*

Table. *Summary table of applicability assessment of remote sensing data for studying hazardous geotechnical processes*

<table>
<tr><td colspan="6">Оценка применимости данных ДЗЗ
Applicability assessment of remote sensing data</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Тип данных
Data type</td><td colspan="2">Космические снимки
Space images</td><td colspan="2">Цифровые модели рельефа
Digital elevation models</td><td rowspan="2">Радарная интерферометрия
Radar interferometry</td></tr>
<tr><td>панхроматические
panchromatic</td><td>мультиспектральные
multispectral</td><td>глобальные
global</td><td>ArcticDEM</td></tr>
<tr><td>Разрешение, м/пикс
Resolution, m/peak
Процесс
Process</td><td>до (to) 1–2</td><td>30</td><td>30</td><td>2</td><td>от (from) 5</td></tr>
<tr><td>Карст/Karst</td><td>Хорошая/good</td><td colspan="2">средняя/medium</td><td colspan="2">хорошая/good</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td>ручное дешифрирование
manual interpretation</td><td>ручное дешифрирование крупных карстовых форм
manual interpretation of large karst forms</td><td>дешифрирование крупных карстовых форм
interpretation of large karst forms</td><td colspan="2">Ограничено по площади
limited in area</td><td>поиск участков подготовки провалообразования
search for sinkholes preparation areas</td></tr>
<tr><td>Оползни
Landslides</td><td colspan="2">хорошая/good</td><td colspan="3" rowspan="2">практически не используются
practically unused</td><td>хорошая
good</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td>в том числе косвенные признаки (оголившийся склон, упавшие деревья и т. д.)
including indirect signs (bare slope, fallen trees, etc.).</td><td>ретроспективный анализ по серии снимков
retrospective analysis from a series of images</td><td>поиск участков смещения грунтов
search for areas of ground displacement</td></tr>
<tr><td>Эрозия и аккумуляция
Erosion and accumulation</td><td colspan="2">хорошая/good</td><td colspan="2">средняя/medium</td><td colspan="2" rowspan="2">практически не используются
practically unused</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td>ручное дешифрирование
manual interpretation</td><td>формирование маски водной поверхности
water surface masking</td><td colspan="2">ручное дешифрирование русловой части водотока
manual interpretation of the channel part of a watercourse</td></tr>
<tr><td>Заболачивание
Waterlogging</td><td colspan="2">хорошая/good</td><td colspan="4" rowspan="2">практически не используются
practically unused</td></tr>
<tr><td>Прим.
Remark</td><td>ручное дешифрирование
manual interpretation</td><td>выделение по результатам спектрального анализа
allocation based on spectral analysis</td></tr>
<tr><td>Термокарст
Thermokarst</td><td colspan="2">хорошая/good</td><td rowspan="2">практически не используются
practically unused</td><td>хорошая
good</td><td rowspan="2">практически не используются
practically unused</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td>ручное дешифрирование
manual interpretation</td><td>выделение по результатам спектрального анализа
allocation based on spectral analysis</td><td>ручное дешифрирование котловины
manual interpretation of the basin</td></tr>
<tr><td>Бугры пучения
Friction knolls</td><td colspan="2">низкая/low</td><td rowspan="2">практически не используются
practically unused</td><td>хорошая
good</td><td rowspan="2">практически не используются
practically unused</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td colspan="2">практически не визуализируются
hardly visualised</td><td>дешифрирование форм
interpretation of forms</td></tr>
<tr><td>Наледи
Ice formation</td><td colspan="2">хорошая/good</td><td colspan="4" rowspan="2">практически не используются/practically unused</td></tr>
<tr><td>Примечание
Remark</td><td>ручное дешифрирование
manual interpretation</td><td>выделение по результатам спектрального анализа
allocation based on spectral analysis</td></tr>
</table>

Рис. 8. *Изменение площади Момской наледи с 25 мая по 16 августа 2024 г.*

Fig. 8. *Change in the Moma ice sheet area from 25 May to 16 August 2024*

Также группой авторов предложен способ картографирования мерзлых пород с использованием космоснимков и цифровой модели рельефа на территории Эльконского горста Южной Якутии. По данным ЦМР SRTM определены уклоны и экспозиции склонов. С использованием космоснимков Landsat-5/TM (каналы 1–5 с разрешением 30 м и канал 6 (тепловой) с разрешением 120 м) и полевых данных (температурных скважин, снегомерной съемки и режимных наблюдений) проанализированы растительный и снежный покровы, радиационная поверхность на изучаемой территории. По результатам обработки данных дистанционного зондирования и полевых исследований получены карты, отражающие крутизну склонов, тип растительности, распространение снежного покрова, радиационную температуру. Затем задан алгоритм определения талых и мерзлых пород по экспозиции, крутизне склона, характерной растительности, высоте снежного покрова и температуре. С использованием алгоритма путем наложения раннее построенных карт выполнено картографирование мерзлых пород [64].

Информация о применимости данных ДЗЗ для изучения опасных инженерно-геологических процессов сведена в таблицу.

Заключение

Пространственное разрешение большинства часто используемых открытых данных ДЗЗ составляет от 10–30 м на пиксель и более, исключение составляют некоторые ЦМР (например, ArcticDEM, ALOS PALSAR), ограниченно покрывающие некоторые области Земного шара. Для идентификации по панхроматическим и мультиспектральным космоснимкам, ЦМР и данным спутниковой интерферометрии размер идентифицируемого объекта должен быть в 1,5–2 раза больше пикселя, причем для достоверного дешифрирования – не менее четырех пикселей. Это накладывает ограничения на минимальный размер объекта и несколько ограничивает прямую его идентификацию посредством данных ДЗЗ.

Применение в исследовании карстового процесса осложняется зачастую малым размером карстовых форм, особенно на начальных этапах их существования, до момента стабилизации бортов форм. Использование открытых данных ДЗЗ для идентификации отдельных проявлений размера менее 30 м весьма проблематично, однако с их помощью можно определить границы карстовых полей. Это весьма информативно на этапе выбора территории для строительства сложных и дорогостоящих объектов и планирования работ. Использование библиотеки открытых панхроматических снимков ESRI Imagery, Google и Yandex высокого разрешения (менее 1 м/пиксель) позволяет закартировать проявления размером от 1 м, однако из-за отсутствия обновления этих данных мониторинговые задачи с их помощью не решить. Как показывает мировой опыт, использование данных спутниковой интерферометрии является весьма перспективным для изучения не только динамики развития существующих карстопроявлений различного диаметра, но и для поиска участков потенциального провалообразования, которому предшествует оседание земной поверхности, регистрируемое радарной съемкой.

Использование открытых данных ДЗЗ для идентификации оползней и районирования территории по степени оползневой опасности очень эффективно, связано это в первую очередь с большим размером оползневых тел и значительными изменениями абсолютных отметок поверхности земли при активизации процесса. Еще одним важным фактором служит разрушительность процесса. Сход оползня, особенно в случае быстрых скоростей смещения оползневого тела вниз по склону, приводит к нарушению целостности и жизнеспособности растительного покрова, что успешно дешифрируется с применением вегетационных спектральных индексов.

Эрозия и заболачивание – процессы, распространение которых даже если и фрагментарно, заметно обширнее по площади, в отличие, например, от карстового процесса. Степень подверженности территории эрозионному процессу зачастую определяют с помощью ЦМР. Использование мультиспектральных снимков для этих целей тоже возможно. Например, при помощи водного индекса NDWI можно отследить изменение положения береговой линии различных водных объектов. Заболачивание определяется по различным спектральным индексам с использованием мультиспектральных снимков, предоставляемых спутниками семейств Landsat и Sentinel.

Изучение дистанционными методами процессов и явлений, развивающихся в области распространения многолетнемерзлых грунтов, – наиболее актуальный для территории России вопрос. При помощи водных индексов можно провести картирование озер различного генезиса, в том числе термокарстового, и оценить динамику изменения их площадей. Среди всех имеющихся данных дистанционного зондирования на северные территории наибольший интерес представляет ЦМР ArcticDEM, площадь ее покрытия и разрешение позволяет проводить крупномасштабные исследования.

В результате анализа большого объема отечественных и зарубежных исследований, посвященных вопросам использования открытых данных ДЗЗ, доступных на территории Российской Федерации, можно сделать вывод, что свободный доступ к ним и инструментарий их обработки дают возможность оперативно и с высокой достоверностью вести оценку опасных инженерно-геологических процессов и их мониторинг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 202. – P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
2. Баборыкин М.Ю., Бурцев А.А., Жидиляева Е.В. Проведение мониторинга опасных геологических процессов на основе результатов воздушного лазерного сканирования // Научные исследования–2017: практическая часть. Разд. «Практические исследования в геологии». – М.: РусАльянс Сова, 2017. – С. 151–225.
3. Баборыкин М.Ю, Миронюк С.Г. Возможности воздушного лазерного сканирования для выявления геологических опасностей на участке берегового примыкания трубопровода // Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2023. – Вып. 8. – С. 48–55. DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-48-55
4. Способ дешифрирования экзогенных геологических процессов и геологических условий: патент № 2655955. URL: https://findpatent.ru/patent/265/2655955.html.
5. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д.В. Долгополов, М.Ю. Баборыкин, Е.В. Жидиляева, В.А. Мелкий // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 25–34. DOI: https://doi.org/10.25714/MNT.2022.52.003
6. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. – М.: Аспект-Пресс, 2004. – 181 с.
7. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – 191 с. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskih-snimkov.pdf (дата обращения 15.08.2024)
8. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 416 с.
9. Landsat Satellite Missions. URL: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions (дата обращения 15.08.2024).
10. Sentinel-1. Radar vision for Copernicus. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (дата обращения 15.08.2024).
11. Sentinel-2. Radar vision for Copernicus. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (дата обращения 15.08.2024).
12. The applications of InSAR technique for natural hazard detection in smart society / J. Jefriza, I.M. Yusoff, I.A. Abir, S. Syahreza, M. Rusdi, P. Razi, H. Lateh // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1572 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1572/1/012067.
13. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши / А.Л. Энтин, П.Г. Михайлюкова, А.И. Кедич, С.В. Харченко // Геоморфология. – 2022. – Т. 53. – № 2. – С. 27–42. DOI: 10.31857/S0435428122020067.
14. Huang J., Yu Y. Vertical accuracy assessment of the ASTER, SRTM, GLO-30, and ATLAS in a forested environment // Forests. – 2024. – Vol. 15 (3). DOI: 10.3390/f15030426
15. Franks S., Rengarajan R. Evaluation of copernicus DEM and comparison to the DEM used for Landsat Collection-2 processing // Remote Sens. – 2023. – Vol. 15. DOI: 10.3390/rs15102509.
16. Comparison of geomorphological parameters detected using MERIT and FABDEM products / A. Borgohain, V. Khajuria, V. Garg, S.R. Koti, A. Bhardwaj // Environmental Sciences Proceedings. – 2023. – Vol. 25 (59). DOI: 10.3390/ECWS-7-14298.
17. ALOS PRISM (AW3D05 STANDARD) and Sentinel-1: evaluation of new sources of digital elevations models / V. Barbosa, R. Cicerelli, T. Almeida, G. Giuliano, S. Rodrigues // Revista Brasileira de Geografia Física. – 2020. – Vol. 13 (5). – P. 2319–2331. DOI: 10.26848/rbgf.v13.5.p2319-2331.
18. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / L. Hawker, P. Uhe, L. Paulo, J. Sosa, J. Savage, C. Sampson, J. Neal // Environmental Research. – 2022. – Vol. 17. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
19. Nikolakopoulos K., Kamaratakis K., Chrysoulakis N. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27 (21). – P. 4819–4838. DOI: 10.1080/01431160600835853.
20. Harvard: ArcticDEM – Strips, Version 4.1 / C. Porter, I. Howat, M.-J. Noh, E. Husby, S. Khuvis, E. Danish, K. Tomko, J. Gardiner, A. Negrete, B. Yadav, J. Klassen, C. Kelleher, M. Cloutier, J. Bakker, J. Enos, G. Arnold, G. Bauer, P. Morin. – 2022. URL: https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS (дата обращения 15.08.2024).
21. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v.2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области / Е.В. Полякова, Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, З.Б. Чистова,

Т.Я. Беленович // Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки. – 2021. – Т. 163. – № 2. – С. 302–319. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
22. Mark D.M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models // Cartographica. – 1984. – Vol. 21. – P. 168–178. DOI: 10.3138/10LM-4435-6310-251R.
23. Антипов В.С., Волин К.А., Журавлев Е.А. Выявление карстовых и суффозионно-карстовых объектов по материалам космических съемок в центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2016. – Вып. 4. – С. 4–16. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.401.
24. Theilen-Willige B. Remote sensing contribution to the detection of karst features and their structural environment in the area of the Bekaa Valley in Central-Lebanon // Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 133–155.
25. Enclosed karst depression identification and analysis for the pumped storage power station reservoir construction using DEM / Y. Bo, Z. Tao, Z. Kexun, Z. Shuangying, H. Xiao, W. Senlin, C. Shiwan // Geofluids. – 2023. – Vol. 4. DOI: 10.1155/2023/4794665.
26. Analysis of the deformation behavior and sinkhole risk in Kerdabad, Iran using the PS-InSAR method / M. Khoshlahjeh Azar, A. Hamedpour, Y. Maghsoudi, D. Perissin // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13 (14). DOI: 10.3390/rs13142696.
27. Detection of sinkhole occurrence, experiences from South Africa / M. Ferentinou, W. Witkowski, R. Hejmanowski, H. Grobler, A. Malinowska // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. – 2020. – Vol. 382. – P. 77–82. DOI: 10.5194/piahs-382-77-2020.
28. Kim J.W., Lu Z., Degrandpre K. Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1a SAR interferometry (preliminary results) // Remote Sens. – 2016. – Vol. 8. – P. 313. DOI: 10.3390/rs8040313.
29. Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapinar Region, Turkey: a multi-sensor InSAR time series study / O. Orhan, T. Oliver-Cabrera, S. Wdowinski, S. Yalvac, M. Yakar // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 774. DOI: 10.3390/s21030774.
30. Fusion of remote sensing and applied geophysics for sinkholes identification in tabular middle atlas of Morocco (the Causse of El Hajeb): impact on the protection of water resource / A. Muzirafuti, M. Boualoul, G. Barreca, A. Allaoui, H. Bouikbane, S. Lanza, A. Crupi, G. Randazzo // Resource. – 2020. – Vol. 9. – P. 51. DOI: 10.3390/9040051.
31. A novel RGB-slope sinkhole dataset and deep weaklysupervised learning framework for sinkhole classification and localization / A. Yavariabdi, H. Kusetogullari, O. Orhan, E. Uray, V. Demir, T. Celik, E. Mendi // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2023. – Vol. 26 (4). – P. 966–973. DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.10.006.
32. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2015. – 472 с.
33. Гудилин И.С., Комаров И.С. Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. – М.: Недра, 1978. – 319 с.
34. Безгодова О.В., Истомина Е.А., Овчинникова Е.В. Оценка и картографирование опасных экзогенных процессов Мондинской котловины на основе морфометрического ландшафтного анализа // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 8. – С. 28–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-938-8-28-37
35. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров L-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея / В.Г. Бондур, Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, Т.Н. Чимитдоржиев, А.В. Дмитриев, П.Н. Дагуров // Исследование Земли из космоса. – 2019 – № 5. – С. 3–14. DOI: 10.31857/S0205−9614201953−14.
36. Смольянинова Е.И., Михайлов В.О., Дмитриев П.Н. Изучение и мониторинг зон проседания в Имеретинской низменности (район Большого Сочи) методом РСА-интерферометрии разночастотных спутниковых радарных снимков за период 2007–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 5. – С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
37. Remote sensing for landslide investigations: a progress report from China / Q. Xu, B. Zhao, K. Dai, D. Xiujun, W. Li, Z. Xing, Y. Yang, X. Xiao, X. Wang, J. Huang, H. Lu. B. Deng, D. Ge // Engineering Geology. – 2023. – Vol. 321 (1). DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107156.
38. Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection / A.C. Mondini, M. Santangelo, M. Rocchetti, E. Rossetto, A. Manconi, O. Monserrat // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11 (7). – 25 p. DOI: 10.3390/rs11070760.
39. Exploring event landslide mapping using Sentinel-1 SAR backscatter products / M. Santangelo, M. Cardinali, F. Bucci, F. Fiorucci, A.C. Mondini // Geomorphology. – 2022. – Vol. 397. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.108021.
40. Rapid mapping of landslides on SAR data by attention U-Net / L. Nava, K. Bhuyan, S.R. Meena, O. Monserrat, F. Catani // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14 (6). DOI: 10.3390/rs14061449.
41. Опыт дистанционного мониторинга опасных геологических процессов по трассе трубопроводных систем (Восточная Сибирь) / А.С. Викторов, Б.В. Георгиевский, В.Н. Капралова, Т.В. Орлов, О.Н. Трапезникова, А.В. Зверев // Геоэкология. инженерная геология. гидрогеология. Геокриология. – 2018. – № 6. – С. 50–58. DOI: 10.1134/S0869780318050095
42. Automatic landslide mapping from satellite imagery with a topography-driven thresholding algorithm / M. Alvioli, A.C. Mondini, F. Fiorucci, M. Cardinali // Geomorphometry. – 2018. DOI: 10.7287/peerj.preprints.27067v1.
43. Topography-driven satellite imagery analysis for landslide mapping / M. Alvioli, A.C. Mondini, F. Fiorucci, M. Cardinali, I. Marchesini // Geomatics Nat. Hazards Risk. – 2018. – Vol. 9 (1). – P. 544–567. DOI: 10.1080/19475705.2018.1458050.
44. Федоров А.В., Шлапак П.А., Муженский Д.А. Исследование линейной эрозии путем создания уточненной цифровой модели рельефа на основе SRTM (на примере территории Хвалынского района Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 36–40. DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-1-36-40.
45. Гайворонская Н.И. Картометрические и морфометрические показатели как основа для выявления природных предпосылок развития экзогенных геоморфологических процессов на территории Белгородской области // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – Вып. 6. – С. 206–213.

46. Дуброва Ю.Н., Мыслыва Т.Н., Ткачева Т.Н. Геоморфометрический анализ рельефа территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – Вып. 1. – С. 209–216.
47. Глотов А.А. Применение данных о рельефе для эффективного использования сельскохозяйственных земель // Геопрофи. – 2013. – Вып. 4. – С. 20–22.
48. Кривогуз Д.О., Малько С.В., Семенова А.Ю. Применение ГИС для определения оползневой устойчивости Крымского полуострова // Геоинформатика. – 2016. – № 3. – С. 3–11.
49. Китаева М.А., Дробинина Е.В. Изучение инженерно-геологических процессов на закарстованных территориях с применением данных дистанционного зондирования Земли // Карст и пещеры: сборник научных трудов (по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием). – Пермь, 28 мая – 1 июня 2024. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. – С. 64–69.
50. Application of remote sensing for identifying soil erosion processes on a regional scale: an innovative approach to enhance the erosion potential model / S. Polovina, B. Radic, R. Ratko Ristic, V. Milcanovi // Remote Sens. – 2024. – Vol. 16 (13). DOI: 10.3390/16132390
51. Khaled M., Abdel A. Quantitative monitoring of coastal erosion and changes using remote sensing in a Mediterranean Delta // Civil Engineering Journal. – 2024. – Vol. 10 (06). DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-06-08.
52. Дюкарев Е.А., Алексеева М.Н., Головацкая Е.А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2017. – № 2. – С. 38–51. DOI: 10.7868/S0205961417020014.
53. Ардашникова С.В. Картографирование болотных микроландшафтов на основе спектральной классификации космических снимков RapidEye // Геоматика. – 2015. – № 2 – С. 46–51.
54. Евдокимов С.И., Михалап С.Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2015. – № 7. – С. 21–32.
55. Казаков А.А. Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестник ТюмГУ. Науки о Земле. – 2013. – № 4. – С. 161–167.
56. Полищук Ю.М., Муратов И.Н., Байсалямова О.А. Дистанционные исследования извилистости береговых границ термокарстовых озёр Большеземельской тундры по снимкам «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 95–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101.
57. Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
58. Disappearing Arctic lakes / L.C. Smith, Y. Sheng, G.M. MacDonald, L.D. Hinzman // Science. – 2005. – Vol. 308 (5727). DOI:10.1126/science.1108142
59. Karlsson M.J., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6 (1). – P. 621–636. DOI: 10.3390/rs6010621.
60. Брыксина Н.А., Евтюшкин А.В., Полищук Ю.М. Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – Т. 4. – № 2. – С.123–128.
61. Полищук Ю.М., Богданов А.Н. Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 104–114.
62. Обнаружение многолетних бугров пучения с использованием декомпозиции цифровых моделей рельефа по топологическим признакам / С.В. Еремеев, А.В. Абакумов, Д.Е. Андрианов, И.В. Богоявленский, Р.А. Никонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 6. – С. 129–143. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143.
63. Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения / Л.А. Гагарин, Н.Е. Баишев, А.Е. Мельников, Е.С. Николаева // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 29 (1). – С .80–95. DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95
64. Выявление и картографирование мерзлых участков с использованием космических снимков (на примере Эльконского горста в южной Якутии) / С.В. Калиничева, М.Н. Железняк, А.Р. Кириллин, А.Н. Федоров // Наука и образование. – 2017. – № 3 (87). – С. 30–37.

Информация об авторах

Елена Викторовна Дробинина, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории инженерно-экологических исследований, доцент кафедры динамической геологии и гидрогеологии геологического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15; https://orcid.org/0000-0002-6756-7947; alenadrobinina@yandex.ru

Елизавета Романовна Романова, преподаватель Московского государственного строительного университета, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; младший научный сотрудник, Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева Российской академии наук, Россия, 109004, г. Москва, ул. Николоямская, 51с1; https://orcid.org/0000-0002-4102-7766; liza170298.romanova@yandex.ru

Марина Алексеевна Китаева, лаборант научно-исследовательской лаборатории инженерно-экологических исследований кафедры динамической геологии и гидрогеологии геологического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15; https://orcid.org/0009-0001-5405-0578; kitaeva0822@yandex.ru

Поступила в редакцию: 21.10.2024
Поступила после рецензирования: 12.11.2024
Принята к публикации: 13.05.2025

REFERENCES

1. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 202. pp. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
2. Baborykin M.Yu., Burtsev A.A., Zhidilyaeva E.V. Monitoring of hazardous geological processes based on the results of airborne laser scanning. *Scientific Research-2017: practical part. Section «Practical Research in Geology»*. Moscow, RusAlliance Sova Publ., 2017. pp. 151–225. (In Russ.)
3. Baborykin M.Yu., Mironyuk S.G. Aerial laser scanning capabilities to identify geological hazards at the pipeline abutment section. *Geoinformation technologies and space monitoring*, 2023, vol. 8, pp. 48–55. (In Russ.) DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-48-55.
4. Baborykin M.Yu. *Method for deciphering exogenous geological processes and geological conditions*. Patent RF, no. 2655955, 2017. (In Russ.)
5. Dolgopolov D.V., Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Melky V.A. Application of air laser scanning technology in geotechnical monitoring for pipeline transport. Monitoring. *Science and Technologies*, 2022, no. 2 (52), pp. 25–34. (In Russ.) DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003.
6. Labutina I.A. *Deciphering aerospace images*. Moscow, Aspect-Press Publ., 2004. 181 p. (In Russ.)
7. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. *Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution*. Perm, Perm State University, 2020. 191 p.
8. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. *Aerospace methods of geographical research*. Moscow, Academy Publ. center, 2011. 416 p. (In Russ.)
9. *Landsat Satellite Missions*. Available at: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions (accessed 15 August 2024).
10. *Sentinel-1. Radar vision for Copernicus*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (accessed 15 August 2024).
11. *Sentinel-2. Radar vision for Copernicus*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (accessed 15 August 2024).
12. Jefriza J., Yusoff I.M., Abir I.A., Syahreza S., Rusdi M., Razi P., Lateh H. The applications of InSAR technique for natural hazard detection in smart society. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1572. DOI: 10.1088/1742-6596/1572/1/012067
13. Entina A.L., Mikhailukovaa P.G., Kedicha A.I., Kharchenko S.V. The modern state of radar interferometry using for estimation of the land surface displacements. *Geomorphology*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 27–42. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0435428122020067.
14. Huang J., Yu Y. Vertical accuracy assessment of the ASTER, SRTM, GLO-30, and ATLAS in a forested environment. *Forests*, 2024, vol. 15 (3). DOI: 10.3390/f15030426
15. Franks S., Rengarajan R. Evaluation of copernicus DEM and comparison to the DEM used for Landsat Collection-2 processing. *Remote Sens*, 2023, vol. 15. DOI: 10.3390/rs15102509.
16. Borgohain A., Khajuria V., Garg V., Koti S.R., Bhardwaj A. Comparison of geomorphological parameters detected using MERIT and FABDEM products. *Environmental Sciences Proceedings*, 2023, vol. 25 (59). DOI: 10.3390/ECWS-7-14298
17. Barbosa V., Cicerelli R., Almeida T., Marotta G., Rodrigues S. ALOS PRISM (AW3D05 STANDARD) and Sentinel-1: evaluation of new sources of digital elevations models. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2020, vol. 13 (5), pp. 2319–2331. DOI: 10.26848/rbgf.v13.5.p2319-2331.
18. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental. *Research*, 2022, vol. 17. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f
19. Nikolakopoulos K.G., Kamaratakis E.K., Chrysoulakis N. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, pp. 4819–4838. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/01431160600835853
20. Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Khuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. *Harvard: ArcticDEM – Strips, Version 4.1*. 2022. Available at: https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS (accessed 15 August 2024).
21. Polyakova E.V., Kutinov Y.G., Mineev A.L., Chistova Z.B., Belenovich T.Ya. Using the ASTER GDEM v.2 global digital elevation model to identify areas of possible activation of karst processes in the Arkhangelsk Region (Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 2, pp. 302–319. (In Russ.) DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.302-319.
22. Mark D.M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models. *Cartographica*, 1984, vol. 21, pp. 168–178. DOI: 10.3138/10LM-4435-6310-251R.
23. Antipov V.S., Volin K.A., Zhuravlev E.A. Identification of karst and karst-suffosion features on satellite imagery in the central part of east European platform. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2016, no. 4, pp. 4–16 (In Russ.) DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.401. (In Russ.)
24. Theilen-Willige B. Remote sensing contribution to the detection of karst features and their structural environment in the area of the Bekaa Valley in Central-Lebanon. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences*, 2024, vol. 8 (2), pp. 133–155.
25. Bo Y., Tao Z., Kexun Z., Shuangying Z., Xiao H., Senlin W., Shiwan C. Enclosed karst depression identification and analysis for the pumped storage power station reservoir construction using DEM. *Geofluids*, 2023, vol. 4. DOI: 10.1155/2023/4794665

26. Khoshlahjeh A.M., Hamedpour A., Maghsoudi Y., Perissin D. Analysis of the deformation behavior and sinkhole risk in Kerdabad, Iran using the PS-InSAR method. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13 (14). DOI: 10.3390/rs13142696.
27. Ferentinou M., Witkowski W., Hejmanowsk R., Grobler H., Malinowska A. Detection of sinkhole occurrence, experiences from South Africa. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, vol. 382, pp. 77–82. DOI: 10.5194/piahs-382-77-2020.
28. Kim J.W., Lu Z., Degrandpre K. Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1a SAR interferometry (preliminary results). *Remote Sens*, 2016, vol. 8, p. 313. DOI: 10.3390/rs8040313.
29. Orhan O., Oliver-Cabrera T., Wdowinski S., Yalvac S., Yaka M. Land subsidence and its relations with sinkhole activity in Karapinar Region, Turkey: a multi-Sensor InSAR time series study. *Sensors*, 2021, vol. 21, p. 774. DOI: 10.3390/s21030774.
30. Muzirafuti A., Boualoul M., Barreca G., Allaoui A., Bouikbane H., Lanza S., Crupi A., Randazzo G. Fusion of remote sensing and applied geophysics for sinkholes identification in tabular middle atlas of Morocco (the Causse of El Hajeb): impact on the protection of water resource. *Resources*, 2020, vol. 9, p. 51. DOI: 10.3390/resources9040051.
31. Yavariabdi A., Kusetogullari H., Orhan O., Uray E., Demir V., Celik T., Mendi E. SinkholeNet: A novel RGB-slope sinkhole dataset and deep weakly supervised learning framework for sinkhole classification and localization. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2023, vol. 26 (4), pp. 966–973. DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.10.006.
32. Bondarik G.K., Pendin V.V., Yarg L.A. *Engineering geodynamics*. Moscow, KDU Publ., 2015. 472 p. (In Russ.)
33. Gudilin I.S., Komarov I.S. *Application of aerial methods in engineering-geological and hydrogeological studies*. Moscow, Nedra Publ., 1978. 319 p. (In Russ.)
34. Bezgodova O.V., Rasputina E.A., Ovchinnikova E.V. Assessment of hazardous exogenous processes of the Mondy depression based on morphometric and landscape analysis. *Geodezia i kartografia*, 2018, vol. 79, no. 8, pp. 28–37. (In Russ.) DOI: 10.22389/0016-7126-2018-938-8-28-37.
35. Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Monitoring of landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: Bureya River Bank Caving Case. *Earth observation and remote sensing*, 2019, no. 5, pp. 3–14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14. (In Russ.)
36. Smolianinova E.I., Mikhailov V.O., Dmitriev P.N. Subsidence monitoring in the Imereti lowland (the Big Sochi region) using multifrequency InSAR data for 2007–2019. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 103–111. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
37. Xu Q., Zhao B., Dai K., Dong X., Li W., Zhu X., Yang Y., Xiao X., Wang X., Huang J., Lu H., Deng B., Ge D. Remote sensing for landslide investigations: a progress report from China. *Engineering Geology*, 2023, vol. 321 (1). DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107156.
38. Mondini A.C., Santangelo M., Rocchetti M., Rossetto E., Manconi A., Monserrat O. Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (7), no. 760. DOI: 10.3390/rs11070760.
39. Santangelo M., Cardinali M., Bucci F., Fiorucci F., Mondini A.C. Exploring event landslide mapping using Sentinel-1 SAR backscatter products. *Geomorphology*, 2022, vol. 397, no. 108021. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.108021.
40. Nava L., Bhuyan K., Meena S.R., Monserrat O., Catani F. Rapid mapping of landslides on SAR data by attention U-Net. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14 (6), no. 1449. DOI: 10.3390/rs14061449.
41. Victorov A.S., Georgievskii B.V., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Zverev A.V. The case study of remote sensing monitoring for geological hazards along pipeline systems (Eastern Siberia). *Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2018, no. 6, pp. 50–58. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0869780318050095.
42. Alvioli M., Mondini A. C., Fiorucci F., Cardinali M. Automatic landslide mapping from satellite imagery with a topography-driven thresholding algorithm. *Geomorphometry*, 2018. DOI: 10.7287/peerj.preprints.27067v1.
43. Alvioli M., Mondini A.C., Fiorucci F., Cardinali M., Marchesini I. Topography-driven satellite imagery analysis for landslide mapping. *Geomatics Nat. Hazards Risk*, 2018, vol. 9 (1), pp. 544–567. DOI: 10. 1080/ 19475 705.
44. Fedorov A.V., Shlapak P.A., Muzhensky D.A. Study of linear erosion by creating a refined digital relief model based on SRTM (using the example of the territory of the Khvalynsky district of the Saratov region). *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2020, no. 1, pp. 36–40. (In Russ.) DOI: 10.18500/1819-7663-2020-20-1-36-40.
45. Gaivoronskaya N.I. Cartometric and morphometric indicators as a basis for determination of natural prerequisites for the development of exogenous geomorphologic processes on the territory of the Belgorod region. *Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, pp. 206–213. (In Russ.)
46. Dubrova Yu.N., Myslyva T.N., Tkacheva T.N. Geomorphometric analysis of the relief of the territory of the Gorki district using remote sensing data. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2021, no. 1, pp. 209–216.
47. Glotov A.A. The elevation data application for the efficient use of agricultural land. *Geoprofi*, 2013, no. 4, pp. 20–22. (In Russ.)
48. Krivoguz D.O., Malko S.V., Semenova A.Yu. Application of GIS to determine landslide stability of the Crimean Peninsula. *Geoinformatica*, 2016, no. 3, pp. 3–11. (In Russ.)
49. Kitaeva M.A., Drobinina E.V. Study of geotechnical processes in karst areas using remote sensing data. *Karst and caves. Collection of scientific papers (based on the materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation.*Perm, May 28 – June 1, 2024. Perm, Perm State University Publ., 2024. pp. 64–69.
50. Polovina S., Radic B., Ratko Ristic R., Milcanovi V. Application of remote sensing for identifying soil erosion processes on a regional scale: an innovative approach to enhance the erosion potential model. *Remote Sens*, 2024, vol. 16 (13). DOI: 0.3390/rs16132390.
51. Khaled A. Abdel. Quantitative monitoring of coastal erosion and changes using remote sensing in a Mediterranean delta. *Civil Engineering Journal*, 2024, vol. 10, no. 06. DOI: 10.28991/CEJ-2024-010s-06-08.
52. Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A. Study of wetland ecosystem vegetation using satellite data. *Earth observation and remote sensing*, 2017, no. 2, pp. 38–51. DOI: 10.7868/S0205961417020014. (In Russ.)
53. Ardashnikova S.V. Wetland microlandscape mapping based on spectral classification of RapidEye images. *Geomatiks*, 2015, no. 5, pp. 46–51. (In Russ.)

54. Evdokimov S.I., Mikhalap S.G. Determination of physical meaning of band combinations of Landsat images for monitoring terrestrial and aquatic ecosystems. *Bulletin of Pskov State University. Series: Natural and Physical and Mathematical Sciences*, 2015, no. 7, pp. 21–32. (In Russ.)
55. Kazakov A.A. Remote geothermal mapping of Western Siberian swamps (using the Tarman swamp massif as an example). *Tyumen State University Herald*, 2013, no. 4, pp. 161–167. (In Russ.)
56. Polishchuk Yu.M., Muratov I.N., Baysalamova O.A. Study of tortuosity of the coastal boundaries of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra using images of Kanopus-V. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 95–101. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-95-101.
57. Dneprovskaya V.P., Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Study of thermokarst changes in discontinuous zone of West-Siberian permafrost based on space images. *Earth observation and remote sensing*, 2009, no. 4, pp. 88–96. (In Russ.)
58. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic lakes. *Science*, 2005, vol. 308 (5727). DOI: 10.1126/science.1108142.
59. Karlsson M.J., Lyon S.W., Destouni G. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in Northwestern Siberia. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6 (1), pp. 621–636. DOI: 10.3390/rs6010621.
60. Bryksina N.A., Evtyushkin A.V., Polischuk Yu.M. Study of the dynamics of changes in thermokarst relief forms using space images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 123–128. (In Russ.)
61. Polishchuk Yu.M., Bogdanov A.N. Active thermokarst zones on permafrost territory and their detecting on space images. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 101–114. (In Russ.)
62. Eremeev S.V., Abakumov A.V., Andrianov D.E., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A. Detection of perennial heaving mounds in digital elevation model images using decomposition by topological features. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, no. 6, pp. 206–213. (In Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143.
63. Gagarin L.A., Baishev N.E., Melnikov A.E., Nikolaeva E.S. Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2024, vol. 29 (1), pp. 80–95. (In Russ.) DOI: 10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95.
64. Kalinicheva S.V., Zheleznyak M.N., Kirillin A.R., Fedorov A.N. Identification and mapping of permafrost using satellite images (on the example of the Elkon Mountain in Southern Yakutia). *The Education and Science Journal*, 2017, no. 4, pp. 161–167. (In Russ.)

Information about the authors

Elena V. Drobinina, Cand. Sc., Researcher, Associate Professor, Perm State University, 15, Bukirev street, Perm, 614068, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-6756-7947; alenadrobinina@yandex.ru
Elizaveta R. Romanova, Lecturer, Moscow State Construction University, 26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation; Junior Researcher, E.M. Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, 51c1, Nikoloyamskaya street, Moscow, 109004, Russian Federation; liza170298.romanova@yandex.ru
Marina A. Kitaeva, Laboratory Assistant, Perm State University, 15, Bukirev street, Perm, 614068, Russian Federation; kitaeva0822@yandex.ru

Received: 21.10.2024
Revised: 12.11.2024
Accepted: 13.05.2025