

Инновационные технологии диагностики и мониторинга состояния водонасыщенности поверхности техногенных массивов из космоса

М.В. Мелихов ✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ m.melikhov@ksc.ru

Резюме: В статье рассмотрены современные проблемы и тенденции в области безопасности и мониторинга техногенных массивов на горных предприятиях в Арктике. Проанализированы возможности и перспективы применения космических технологий дистанционного зондирования Земли в задачах контроля и управления рисками, связанными с изменением степени водонасыщенности и нестабильным состоянием вмещающих грунтов. Представлен метод дистанционного площадного мониторинга поверхности техногенных массивов с помощью машинного зрения, заключающийся в применении мультиспектральных оптико-электронных спутниковых систем путем автоматизированного дешифрования и геопространственного анализа космоснимков на основе критерия, связывающего водонасыщенность среды со склонностью грунтов к развитию опасных экзогенных геологических процессов и явлений. На примере действующего горнопромышленного комплекса в Север-Западной Арктической зоне Российской Федерации показаны результаты спутниковых наблюдений за состоянием техногенных откосов в районе разделительной дамбы хвостохранилища с целью выявления и локализации зон повышенного водонасыщения намывных грунтов при риске проявления гидрогеомеханических фильтрационно-деформационных процессов для обеспечения промышленной безопасности объекта и нормального режима его эксплуатации.

Ключевые слова: арктические территории, горная промышленность, техногенные массивы, гидротехнические сооружения, промышленная безопасность, водонасыщенность грунтов, дистанционное зондирование, геоданные

Благодарности: Статья подготовлена в рамках государственного задания по теме FMEZ-2025-0052.

Для цитирования: Мелихов М.В. Инновационные технологии диагностики и мониторинга состояния водонасыщенности поверхности техногенных массивов из космоса. *Горная промышленность*. 2026;(3):98–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-98-104>

Innovative technologies for assessing and monitoring of surface water saturation of man-made rock and soil masses from space

M.V. Melikhov ✉

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ m.melikhov@ksc.ru

Abstract: This article examines current challenges and trends in the safety and monitoring of man-made rock and soil masses at Arctic mining operations. It also analyzes the potential and prospects for using space-based remote sensing technologies to monitor and manage risks associated with changes in water saturation and instability of the country rocks. A method for remote area monitoring of man-made rock and soil masses using machine vision is presented. This method utilizes multispectral optical-electronic satellite systems for automated decoding and geospatial analysis of satellite images based on the correlation patterns between water saturation of the media and the ground susceptibility to hazardous exogenous geological processes and phenomena. Results of satellite observations of the man-made slope condition in the tailings dam area are shown using the case of an operating mining complex in the North-West Arctic zone of the Russian Federation. The aim is to identify and localize zones of the filled-up ground with higher water saturation characterized with the risk of hydrogeomechanical filtration and deformation processes to ensure the industrial safety of the facility and its normal operation.

Keywords: Arctic territories, mining industry, man-made rock and soil masses, hydraulic structures, industrial safety, soil water saturation, remote sensing, geodata

Acknowledgement: The article was prepared as part of State Assignment No. FMEZ-2025-0052.

For citation: Melikhov M.V. Innovative technologies for assessing and monitoring of surface water saturation of man-made rock and soil masses from space. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):98–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-98-104>

Введение

В горной промышленности космические и цифровые технологии на основе методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) применяются для создания геоинформационной продукции (карты, модели, геоданные и др.) и наблюдений за объектом, что позволяет решать различные производственные задачи [1–5]. Одними из актуальных и перспективных направлений внедрения спутниковых систем являются диагностика и мониторинг техногенных массивов (в частности, хвостохранилищ и отвалов) при разработке месторождений в Арктике [6; 7]. Это обусловлено сложной спецификой вопросов и подходов комплексного обеспечения их промышленной безопасности [8] в минимизации и предотвращении рисков возникновения техногенных аварий катастрофических масштабов. Здесь следует весьма оперативно отслеживать состояние водонасыщенности вмещающих грунтов и других влияющих факторов на достаточно большой площади территории в сложных климатических условиях в реальном времени [9; 10]. К ключевым риск-факторам могут быть отнесены: неконтролируемые изменение и превышение уровня грунтовых вод или перелив воды через дамбу / ограждающее сооружение, подтопление или проседание территории, геологические явления и земные деформации, выветривание и пыление грунтов, а также плохое состояние инфраструктуры и недостатки производственных систем мониторинга и управления [11–15]¹.

В настоящее время в этой сфере существуют следующие проблемы и тенденции:

1. **Сложность и комплексность.** Мониторинг требует комплексного решения, охватывающего множество факторов, включая оценку состояния грунтовых вод, степени водонасыщенности техногенных массивов и структурной целостности инженерных сооружений на крупномасштабных территориях.
2. **Отсутствие современных систем и технологий.** Многие горные предприятия не имеют собственных высокоэффективных автоматизированных и дистанционных систем контроля и управления, которые могли бы обеспечивать полное и оперативное получение геопространственной информации о реальном состоянии объектов.
3. **Недостаток данных.** Отсутствие актуальных данных и неэффективность процедур управления затрудняют оперативное реагирование и принятие решений в случае возникновения колоссальных катастрофических событий и чрезвычайных ситуаций.
4. **Необходимость постоянного контроля.** Ответственность собственника компании в соответствии с действующим законодательством, а также повышенное внимание со стороны государственных органов надзора и инвесторов в целом требуют более строгого и непрерывного контроля над потенциально опасными промышленными объектами и отдельными инженерными сооружениями.

Стоит заметить, что своевременные диагностика и оценка состояния водонасыщенности техногенных откосов позволяют контролировать и управлять водным балансом и механизмами равномерного и рационального распределения промышленных вод, в том числе продуктов переработки и обогащения полезных ископаемых, предотвращать и снижать экологические риски. В практическом аспек-

те производственная система мониторинга создается по принципу автономности и дискретности, основывающихся на регулярном и периодическом проведении лабораторных испытаний выборочных образцов грунтов, определении влажности и расчете коэффициента водонасыщения, в том числе с помощью полевых методов, таких как визуальные и гидрологические исследования, а также анализа косвенных признаков.

Принимая во внимание вышесказанное, на горном предприятии внедрение космических и цифровых технологий ДЗЗ может реализовываться в составе действующей системы наблюдений благодаря высокой степени интеграции и взаимозаменяемости геоданных в едином виртуальном пространстве [16]. Современные спутниковые системы способны обеспечить постоянный контроль и мониторинг всей территории, в частности хвостохранилищ и отвалов, с некоторыми техническими ограничениями с точки зрения детализации и периодичности съемок в северных широтах. Здесь важно отметить, что в соответствии с действующим законодательством данные с космических аппаратов (КА) имеют юридическую силу и являются проверенным достоверным источником информации. При этом следует иметь в виду, что спутниковые наблюдения должны основываться на правильном выборе методических подходов и программно-технического инструментария с учетом поставленных задач для обеспечения высокой степени информативности и интеграции данных на производстве.

Цель и задачи исследования заключались в совершенствовании методов дистанционного площадного мониторинга и оценки состояния водонасыщенности поверхности техногенных массивов с применением автоматизированных спутниковых систем для дешифрования и геопространственного анализа космоснимков посредством машинного зрения для оперативного обнаружения и локализации нестабильных зон.

Материалы и методы

В Горном институте КНЦ РАН в рамках фундаментальных и прикладных исследований осуществляется разработка подходов и методов к применению космических и цифровых технологий ДЗЗ в составе комплексной многоуровневой системы наблюдений и мониторинга [17] в задачах геоинформационного сопровождения строительства и эксплуатации промышленных объектов в Арктике.

Разработан новый метод дистанционной площадной съемки и определения степени водонасыщенности поверхности техногенных массивов (карьеров, отвалов, хвостохранилищ и др.) [18], основанный на изучении степени водонасыщенности среды по данным мультиспектральных инфракрасных оптико-электронных спутниковых систем. Оценка производится на основе критерия, связывающего водонасыщенность среды со склонностью грунтов к развитию опасных экзогенных геологических процессов. Особенностью метода является возможность автоматизированного дешифрования и геопространственного анализа космоснимков с помощью машинного зрения.

Цель достигается с помощью КА Sentinel-2 посредством комбинации ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов электромагнитного спектра на основе стандартизованного нормализованного разностного водного индекса Normalized Difference Moisture Index (NDMI). КА Sentinel-2 оснащены камерой MSI, имеющей комбинированное разрешение 10/20 м, с 12 каналами (RGB+NIR+SWIR), производящи-

¹ WMTF: World Mine Tailings Failures — from 1915. Available at: <https://worldminetailingsfailures.org/> (accessed: 19.01.2026).

Общий вид и характеристики КА:

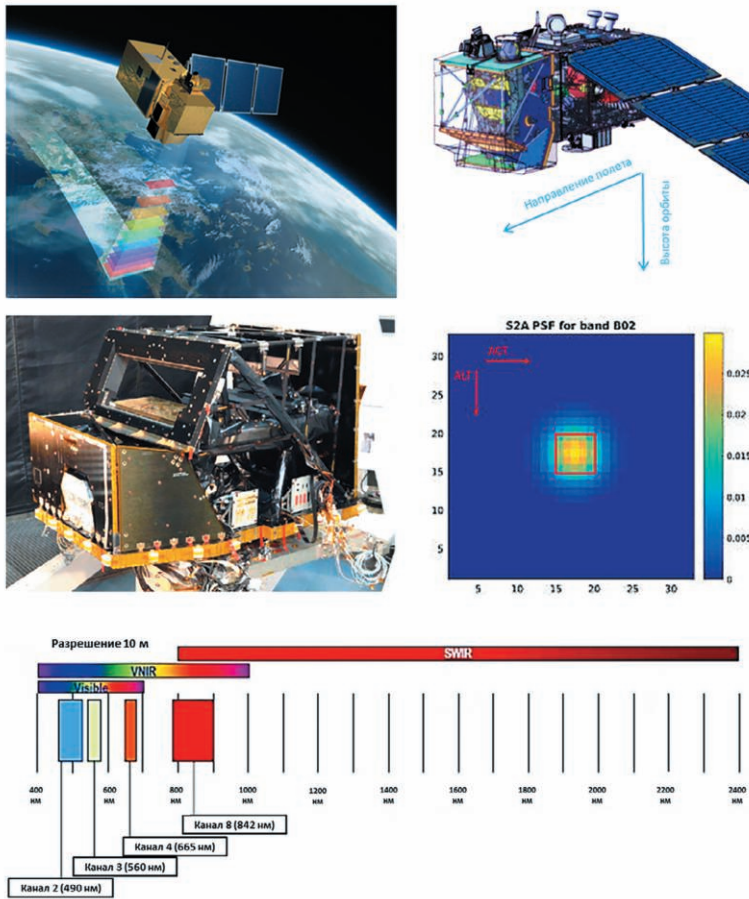


Рис. 1
Фото и основные сведения о КА Sentinel-2

Источник / Source: Sentinel-2 mission guide. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed: 19.01.2026); The Sentinel-2 satellite attitude control system – challenges and solutions – Scientific Figure on ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Key-characteristics-of-the-Sentinel-2-satellite-Key-Characteristics_tbl1_271584776 (accessed: 19.01.2026)

Периодичность съемки КА:

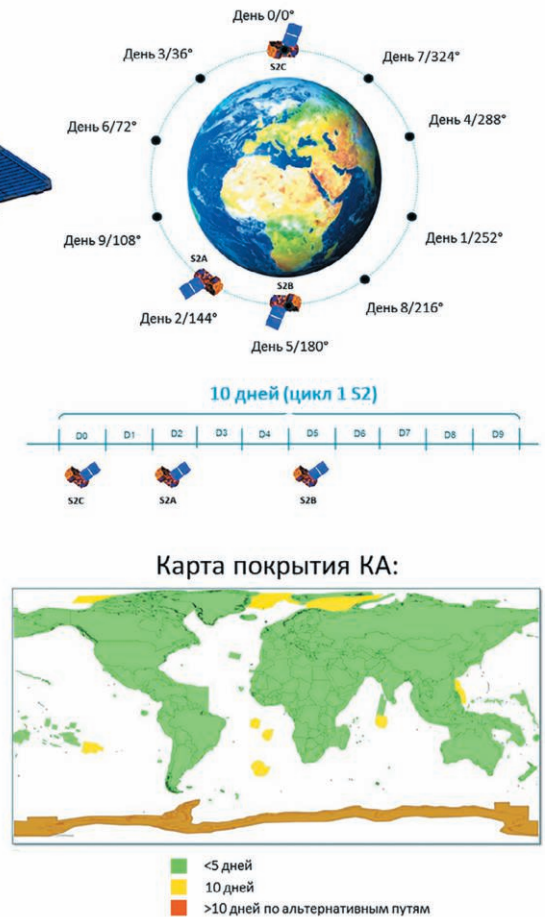


Fig. 1
Images and key information on the Sentinel-2 satellite

ми съемку в видимом/инфракрасном режиме соответственно. Общие сведения и основные характеристики КА Sentinel-2 приведены на рис. 1 и в табл. 1. Данные спутниковые системы проходят ежегодную регламентную проверку и сертификацию на точность и достоверность геоданных. Космоснимки предоставляются в виде цифровых изображений в стандартизованных форматах и содержат базовый набор метаданных (время, координаты, пространственное разрешение и др.). Сбор и обработка космоснимков производится с использованием открытых сертифицированных программ: SNAP / Sentinel Hub EO Browser, QGIS / Google Earth и др.

Дешифрование и геопространственный анализ космоснимков выполняются путем применения визуализированных и автоматизированных методов на основе разработанной классификации грунтов. В решении данной задачи используется показатель NDVI для определения содержания воды и мониторинга стресс-состояний объекта. Справочный диапазон значений NDMI составляет от -1 до 1 ед.², где отрицательные значения (NDMI = 0 – -1 ед.) соответствуют неводонасыщенным (сухим), и, наоборот, положительные значения (NDVI = 0 – 1 ед.) – водонасыщенным средам соответственно. Данный показатель может

характеризовать степень водонасыщенности поверхности грунтов и их склонность к развитию опасных техногенных процессов и явлений. Расчет показателя NDMI осуществляется посредством комбинации спектральных каналов электромагнитного спектра с помощью специализированного программного обеспечения с открытым исходным кодом и со встроенной системой программирования.

В процессе спутниковых наблюдений осуществляются идентификация и картирование зон с разной степенью водонасыщенности на поверхности техногенных массивов на основе их отражательной способности по границам отличенных сред в зависимости от содержания воды. Проводится первичный комплексный анализ исходных данных инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, который включает визуальные, полевые и лабораторные исследования, а также камеральную обработку гидрогеологических данных по содержанию и распределению воды в грунтах. Обработка и анализ спутниковых данных производится с использованием визуализированных и автоматизированных методов на основе классификации грунтов, приведенной в табл. 2. Выполняются автоматическое построение и визуализация спутниковых изображений в выбранной области по заданным параметрам съемки посредством использования встроенных программных алгоритмов и инструментария. Производятся геометри-

² Normalized Difference Moisture Index (NDMI). Available at: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndmi/> (accessed: 19.01.2026).

Таблица 1
Основные характеристики
КА Sentinel-2

Table 1
Key specifications
of the Sentinel-2 satellite

Технические характеристики	
Масса	1140 кг
Размеры	3,4 × 1,8 × 2,35 м (при запуске)
Мощность	1700 Вт
Источники питания	1 панель GaAs солнечных батарей площадью 7,2 м ² , АКБ 87 А·ч
Срок активного существования	7 лет
Элементы орбиты	
Тип орбиты	Солнечно-синхронная орбита
Наклонение	98,5°
Период обращения	100,5 мин
Интервал повторения	5 дней (для 2-х КА)
Высота орбиты	786 км
Целевая аппаратура	
Инструменты	Мультиспектральная камера MSI
Пространственное разрешение	10, 20, 60 м
Полоса захвата	290 км
Спектральная полоса	443–2190 нм
Скорость передачи	2 Гбит/с
Бортовая память	2,4 ТБ

Источник / Source: Sentinel-2 mission guide. Available at: <https://sentinel2.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed: 19.01.2026); The Sentinel-2 satellite attitude control system – challenges and solutions – Scientific Figure on ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Key-characteristics-of-the-Sentinel-2-satellite-Key-Characteristics_tbl1_271584776 (accessed: 19.01.2026)

Таблица 2
Классификация грунтов
по водонасыщенности
на основе показателя NDMI

Таблица 2
Classification of soils
by water content based
on the NDMI index

Типы грунтов	Значения NDMI
Водонасыщенные	0,2* – 1
Средней водонасыщенности	-0,2* – 0,2*
Неводонасыщенные (сухие)	-0,2* – -1

* Эмпирический показатель (на примере апатит-нефелиновых месторождений): NDMI > 0,24 – риски фильтраций, суффозий, оползней, просадок и т.д.; NDMI < -0,26 – риски выветривания, пыления и т.д.

Источник: [18]

* An empirical indicator (using apatite-nepheline deposits as an example): NDMI > 0.24 – risks of seepage, suffusion, soil flows, landslides, subsidence, etc.; NDMI < -0.26 – risks of erosion, dust formation, etc.

Source: [18]

зация и оконтуривание исследуемого объекта с последующим автоматическим расчетом и статистическим анализом показателя NDMI, а также определение диапазона его значений в пределах выделенных границ территории в указанный период времени. Картирование водонасыщенных зон и их точная геопривязка к рельефу местности выполняются посредством совмещения контуров в геоин-

формационной системе. Затем проводятся обобщенный интегрированный анализ и проверка спутниковых данных посредством их сопоставления с результатами выборочного лабораторного отбора проб грунтов и другими полевыми данными, а также путем комплексирования оптических и инфракрасных космоснимков с целью повышения надежности и достоверности геоданных.

В прикладном значении метод позволяет удаленно идентифицировать и локализовать зоны с разной степенью водонасыщенности на поверхности техногенных массивов в задачах контроля и управления промышленными рисками при борьбе с геологическими и гидрогеомеханическими процессами и явлениями (фильтрации, суффозии, оползни, оползни, просадки, выветривание, эрозии, пыление и т.д.) для обеспечения безопасности горнодобывающих комплексов на мультимасштабных территориях.

Результаты и их обсуждение

Практическая реализация подхода показана на примере действующего апатит-нефелинового хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» (Мурманская область) с целью изучения степени водонасыщения техногенных намывных откосов разделительной дамбы и выявления признаков возможных поверхностных проявлений потенциально опасных гидрогеомеханических фильтрационно-деформационных процессов в обеспечении промышленной безопасности гидротехнического сооружения и нормального режима его эксплуатации.

Дистанционная площадная спутниковая съемка проведена с помощью КА Sentinel-2 L2A с учетом атмосферной коррекции данных. За период 2022–2024 гг. в общей сложности произведен сбор и обработано 964 космоснимка в режиме облачности до 10%. Из них отобрано и детально проанализировано 173 изображения с комбинированным пространственным разрешением 10/20 м/пикс в следующем соотношении: 2022 г. – 33 ед.; 2023 г. – 41 ед.; 2024 г. – 99 ед. Дешифрование и интегрированный геопрограммный анализ космоснимков выполнены с помощью прикладного программного обеспечения и геоинформационной системы.

По данным спутниковых наблюдений были установлены закономерности изменения динамики поверхностного водонасыщения техногенных намывных откосов разделительной дамбы рассматриваемого хвостохранилища в зависимости от сезонности. Наиболее представительные космоснимки, полученные с КА Sentinel-2 L2A и обработанные посредством индекса NDMI, представлены на рис. 2. Анализ спутниковых данных показал, что повышенная степень водонасыщения намывных грунтов на поверхности рассматриваемой дамбы фиксировалась в основном в паводковые сезоны, а именно: в мае–июле 2022 г. и мае–июне 2023–2024 гг. На основе пространственно-временного анализа были выявлены признаки повышенного водонасыщения поверхности техногенных грунтов непосредственно в верхней части дамбы с локацией наибольшего количества водонасыщенных зон преимущественно в Южном и Центральном секторах в районе понижения высотных отметок в следующие сезонные циклы: апрель–июль 2022 г., май 2023 г. и апрель 2024 г. Также впервые инструментально подтверждено, что весенний паводковый сезон (апрель–май) сопровождается и характеризуется резким (составляющим от нескольких дней до недель) изменением степени водонасыщения поверхности намывных откосов с формированием максимального количества

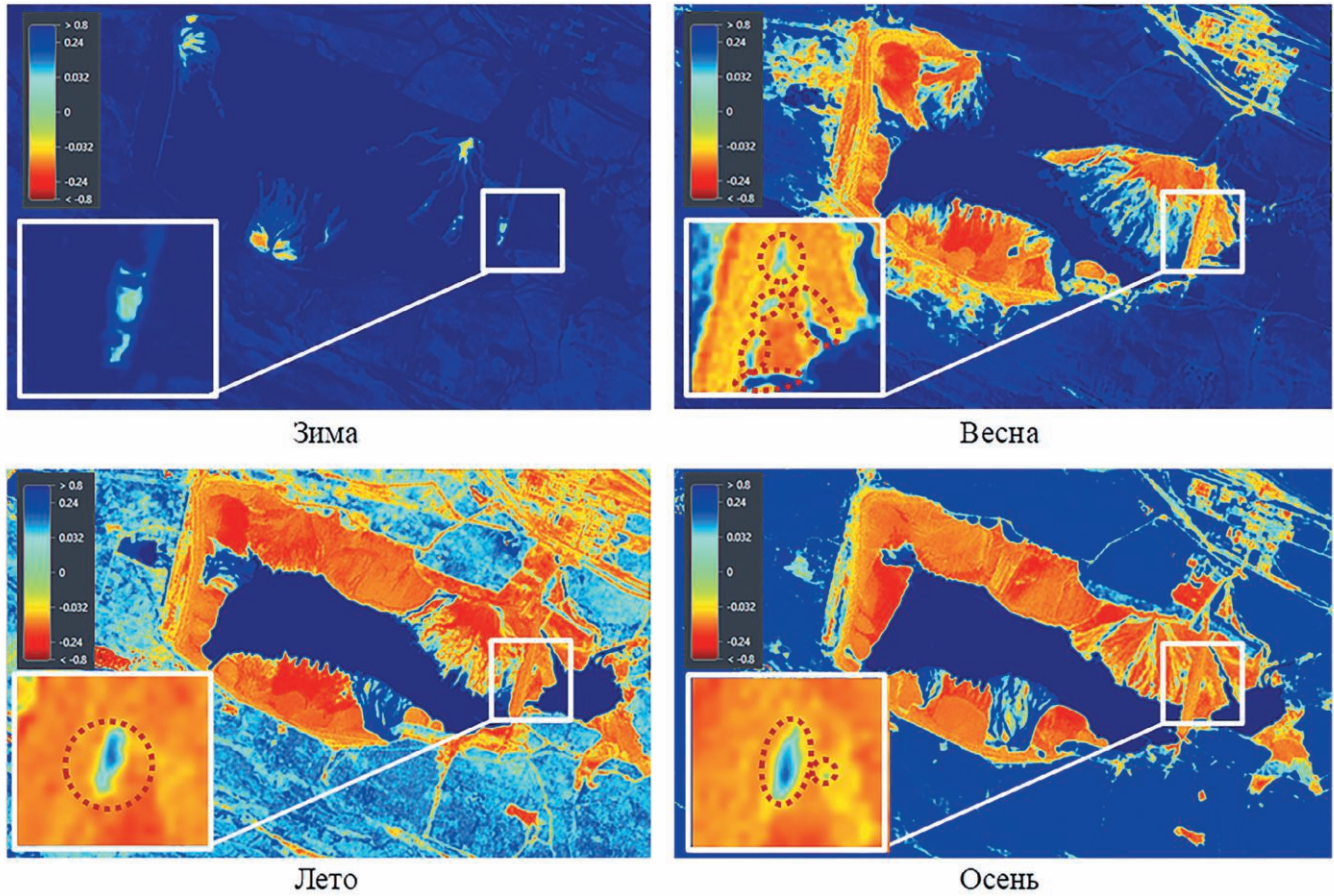


Рис. 2
 Мониторинг водонасыщенности поверхности разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 АО АПАТИТ с помощью спутниковых систем Sentinel-2 на основе индекса NDMI:
 ☉ – зоны экстремального водонасыщения техногенных грунтов

Fig. 2
 Monitoring of surface water saturation at the tailings dam of the Apatite-Nepheline Concentration Plant No. 3 (APATIT JSC) using Sentinel-2 satellite imagery based on the NDMI index:
 ☉ – areas of extreme water saturation in man-made soils

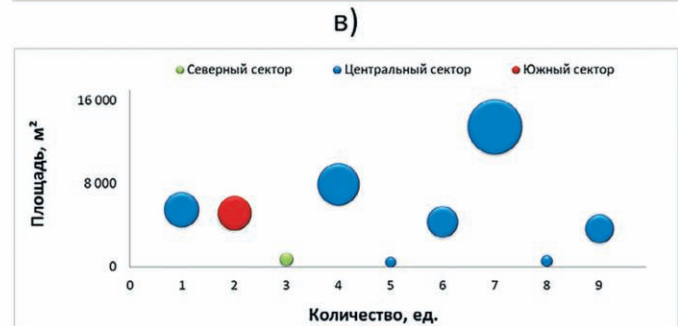
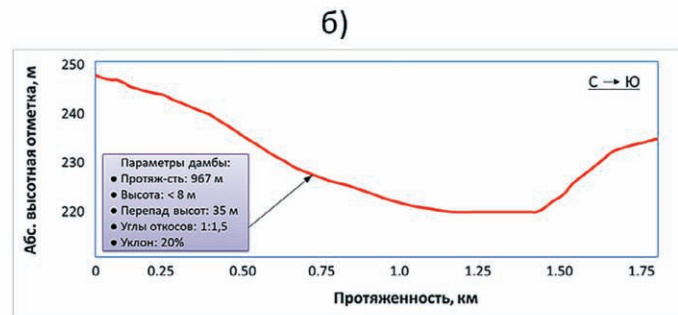
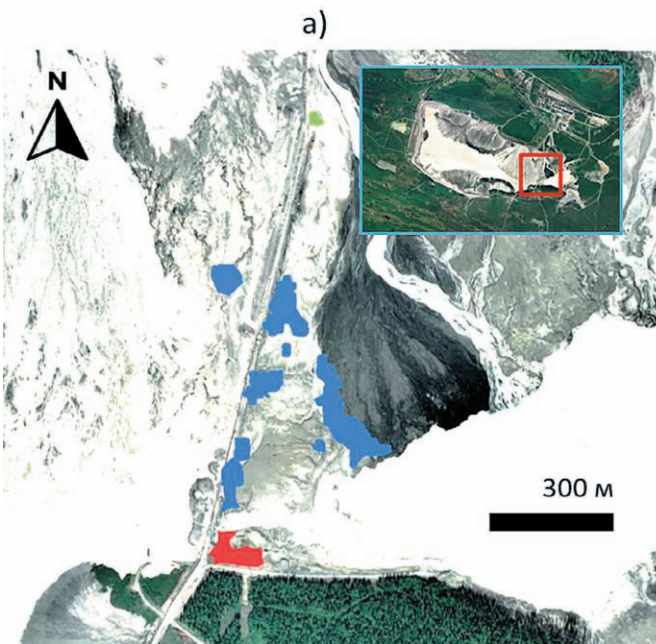


Рис. 3
 Результаты спутниковых наблюдений за состоянием водонасыщенности поверхности разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 АО АПАТИТ: а – картирование водонасыщенных зон; б – профиль и параметры дамбы; в – гистограмма распределения водонасыщенных зон

Fig. 3
 Results of satellite observations of the water saturation of the tailings dam surface at the Apatite-Nepheline Concentration Plant No. 3 (APATIT JSC): а – mapping of the water-saturated zones; б – a profile and parameters of the tailings dam; в – a distribution diagram of the water-saturated zones

локальных зон повышенного водонасыщения грунтов, преимущественно на одной из сторон (Восточной) дамбы в Юго-Восточном направлении в Северном и Центральном секторах гидротехнического сооружения. В свою очередь, в летне-осенний (июнь–октябрь) период года состояние техногенных намывных откосов стабилизируется со значительным уменьшением количества и размеров водонасыщенных зон на поверхности вмещающего техногенного массива. В сезонные летне-осенние (июнь–сентябрь) циклы 2022–2024 гг. на исследуемом объекте прослеживалась выраженная локация ранее обнаруженных достаточно крупных динамически изменяющихся водонасыщенных зон. При этом одна из выявленных зон повышенного водонасыщения была образована вследствие регулярных сбросов пульпы в рядом расположенный прудок-отстойник промышленных вод. На противоположной стороне (Западной) дамбы в Северо-Западном направлении также выявлено относительно небольшое количество водонасыщенных зон на поверхности техногенных намывных откосов, что имело место в определённые периоды: май–август 2022 г., июнь–июль 2023 г.; май–июнь и сентябрь 2024 г. Признаки повышения уровня грунтовых вод в прудках-накопителях хвостохранилища и подмывания разделительной дамбы с выраженным формированием характерных зон отслеживались со спутников в разные годовые циклы: май–июнь 2022 г., июнь–сентябрь 2023 г. и май–сентябрь 2024 г.

По результатам спутниковых наблюдений были построены информационные карты потенциальных рисков и сформированы базы данных (рис. 3), содержащие картографическую и аналитическую информацию об обнаруженных и идентифицированных водонасыщенных зонах на поверхности исследуемых техногенных намывных откосов разделительной дамбы хвостохранилища, а также даны типовые рекомендации по их дальнейшему детальному обследованию и постоянному контролю.

Заключение

В рамках проведенных исследований были развиты подход и метод к дистанционному площадному мониторингу техногенных массивов с применением современных мультиспектральных оптико-электронных спутниковых систем с помощью машинного зрения. Цель достигнута путем автоматизированного дешифрования и геопространственного анализа космоснимков на основе критерия, характеризующего стресс-состояние земной поверхности исследуемых объектов по наличию и содержанию воды. Приведена разработанная классификация грунтов по степени водонасыщенности с использованием спутниковых данных на основе стандартизованного нормализованного разностного водного индекса с открытым исходным кодом в решении прикладных задач, связанных с оценкой и обеспечением надежности и устойчивости откосов техногенных массивов. На примере действующего горного предприятия в Северо-Западной Арктической зоне Российской Федерации показаны результаты космического мониторинга одного из наиболее крупных хвостохранилищ, где были выполнены идентификация и картирование водонасыщенных зон на поверхности техногенных намывных откосов разделительной дамбы при риске возможных проявлений и развития потенциально опасных гидрогеомеханических фильтрационно-деформационных процессов и явлений. Подход и метод при соблюдении определенных условий могут быть успешно применены на других объектах (карьерах, отвалах, гидротехнических сооружениях, хвостохранилищах и т.д.) в обеспечении их промышленной и экологической безопасности.

Список литературы / References

1. Rajan Giriya R., Mayappan S. Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2019;10(2):79–106. <https://doi.org/10.1080/19479832.2019.1589585>
2. Loginov D.S. Web technologies in cartographic support of geological exploration. *Proceedings of the International Cartographic Association*. 2021;4:68. <https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-68-2021>
3. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(6):1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061846>
4. Werner T.T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(3):993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
5. Zheng M., Deng K., Fan H., Du S. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE. *Remote Sensing*. 2018;10(9):1392. <https://doi.org/10.3390/rs10091392>
6. Мелихов М.В. Геоинформационное обеспечение складирования горнопромышленных отходов на основе космических и цифровых технологий. В кн.: *Цифровые технологии в горном деле: материалы 5-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Апатиты, 13–16 июня 2023 г.* Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2023. С. 32–33.
7. Мелихов М.В. Мультиплощадной космический мониторинг хранилищ отходов горного производства в Арктике. *Горная промышленность*. 2024;(5S):21–27. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-21-27>
Melikhov M.V. Multi-area satellite monitoring of mining waste disposal sites in the Arctic. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):21–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-21-27>

8. Калашник А.И. Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона. *Горный журнал*. 2020;(9):101–106. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.15>
Kalashnik A.I. Integrated research and monitoring of mine tailings on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):101–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.15>
9. Melikhov M.V., Kalashnik A.I., Ostapenko S.P., Lebedik E.Yu. Integrated approach to remote monitoring of waterworks facilities in the mining industry using space and digital technologies. *Journal of Mining Science*. 2025;61(1):155–164. <https://doi.org/10.1134/S1062739125010168>
10. Kalashnik N.A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2388:012149. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2388/1/012149>
11. Zare M., Nasategay F., Gomez J.A., Moayed Far A., Sattarvand J. A review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems. *Minerals*. 2024;14(6):551. <https://doi.org/10.3390/min14060551>
12. Franks D.M., Stringer M., Torres-Cruz L.A., Baker E., Valenta R., Thygesen K. et al. Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*. 2021;11:5353. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84897-0>
13. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2021;11(1):249–289. <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>
14. Clarkson, L., Williams, D. Critical review of tailings dam monitoring best practice. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020;34(2):119–148. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1625172>
15. Амосов П.В., Бакланов А.А., Горячев А.А., Кони́на О.Т., Красавцева Е.А., Макаров Д.В. и др. *Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения*. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2023. 168 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.505.8>
16. Мелихов М.В. Особенности геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных природно-технических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):29–41. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_29
Melikhov M.V. Features of geoinformation space monitoring of mining natural-technical systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):29–41. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_29
17. Калашник А.И., Максимов Д.А., Калашник Н.А., Дьяков А.Ю., Запорожец Д.В., Мелихов М.В. *Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнодобывающих предприятий Северо-Западной части Российского сектора Арктики*. - Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2022. 250 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.465.5>
18. Мелихов М.В. Дистанционный метод определения водонасыщенности объектов наземной горной инфраструктуры. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2025;16(3):154–161. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2025.16.3.011>
Melikhov M.V. Remote sensing method for determining water saturation of ground-based mining infrastructure facilities. *Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences*. 2025;16(3):154–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2025.16.3.011>

Информация об авторе

Мелихов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8283-2799>; e-mail: m.melikhov@ksc.ru

Information about the author

Mikhail V. Melikhov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8283-2799>; e-mail: m.melikhov@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.2026
Поступила после рецензирования: 24.03.2026
Принята к публикации: 16.04.2026

Article info

Received: 11.03.2026
Revised: 24.03.2026
Accepted: 16.04.2026