

Научная статья
УДК 528.8, 622
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.011

ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Михаил Владимирович Мелихов[✉]

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия,
m.melikhov@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8283-2799>

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с опытом эксплуатации и диагностикой состояния водонасыщенности горнопромышленных гидротехнических сооружений в Арктике. Представлен метод интеллектуального дистанционного площадного мониторинга и оценки стресс-состояний поверхности техногенных массивов, 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 геопро пространственного анализа космоснимков с помощью машинного зрения. На примере действующих хвостохранилищ горных предприятий показаны опыт и результаты спутниковой съемки и оценки степени водонасыщенности техногенных грунтов в задачах контроля и управления промышленными рисками.

Ключевые слова:

Арктика, горные предприятия, техногенные массивы, горные отходы, водонасыщенность грунтов, опасные геологические процессы, риски, мониторинг, дистанционное зондирование

Для цитирования:

Мелихов М. В. Дистанционный метод определения водонасыщенности объектов наземной горной инфраструктуры // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 3. С. 154–161. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.011.

Original article

REMOTE SENSING METHOD FOR DETERMINING WATER SATURATION OF GROUND-BASED MINING INFRASTRUCTURE FACILITIES

Mikhail V. Melikhov[✉]

Mining institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
m.melikhov@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8283-2799>

Abstract

This article examines issues related to the operating experience and diagnostics of water saturation in mining hydraulic structures in the Arctic. It presents a method for intelligent remote area monitoring and assessment of surface stress conditions of man-made structures, based on studying the degree of water saturation of the environment using data from multispectral infrared optical-electronic satellite systems. The assessment is based on a criterion linking the water saturation of the environment with the susceptibility of soils to the development of hazardous exogenous geological processes. A distinctive feature of this method is the ability to automatically decipher and geospatially analyze satellite images using machine vision. Using operating tailings dams at mining enterprises as an example, the article presents the experience and results of satellite imaging and assessment of the degree of water saturation of man-made soils for monitoring and managing industrial risks

Keywords:

the Arctic, mining enterprises, man-made massifs, mining waste, soil water saturation, hazardous geological processes, risks, monitoring, remote sensing

For citation:

Melikhov M. V. Remote sensing method for determining water saturation of ground-based mining infrastructure facilities. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2025, Vol. 16, No. 3, pp. 154–161. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.011.

Введение

В настоящее время при разработке месторождений в Арктике к актуальным проблемам следует отнести задачи контроля и диагностики построенных в техногенных массивах особо опасных гидротехнических сооружений (хвостохранилищ, отстойников т. д.) и других горных объектов (карьеров, отвалов и т. д.) для своевременного принятия правильных управленческих решений с учетом негативного влияния воды. Такая ситуация обусловлена сложной спецификой вопросов и подходов к комплексному обеспечению их промышленной безопасности при предотвращении катастрофических рисков аварий техногенного характера [1]. В рассматриваемых условиях необходимо оперативно отслеживать состояние водонасыщенности техногенных грунтов и других факторов на достаточно большой площади в экстремальных климатических условиях в реальном времени [2; 3]. К ключевым риск-факторам здесь можно отнести: неконтролируемое изменение и превышение уровня грунтовых вод или перелив воды через дамбу либо защитное ограждение, подтопления территории, геологические явления и пыление отходов, а также плохое состояние инфраструктуры и недостатки производственных систем мониторинга и управления [4–9].

Как правило, диагностика и оценка степени водонасыщенности на рассматриваемых объектах проводятся дискретно с помощью лабораторных испытаний выборочных образцов грунта (включая определение влажности и расчет коэффициента водонасыщения), с помощью полевых методов, таких как визуальные и гидрологические исследования, а также анализа косвенных признаков.

Принимая во внимание вышесказанное, одним из перспективных решений является применение космических и цифровых технологий в области дистанционного зондирования Земли, что в техническом аспекте может реализовываться в составе действующей системы наблюдений благодаря высокой степени интеграции и взаимозаменяемости данных в едином цифровом пространстве [10]. Современные спутниковые системы способны обеспечить постоянный контроль и мониторинг всей территории опасных поднадзорных и бесхозных объектов с некоторыми техническими ограничениями с точки зрения детализации и периодичности съемок в северных широтах. На практике контроль и управление техногенными рисками с использованием спутниковых систем производится посредством создания и анализа геоинформационной продукции (карт, моделей, геоданных и др.), что позволяет решать различные производственные задачи [11–17]. Здесь важно отметить, что в соответствии с действующим законодательством данные с космических аппаратов имеют юридическую силу, являясь достоверным и проверенным источником информации. При этом следует иметь в виду, что спутниковые наблюдения должны основываться на обоснованном выборе методических приемов и программно-технического инструментария с учетом конкретных задач и местных условий.

Цель и задачи исследования заключались в совершенствовании методов дистанционного площадного мониторинга и оценки состояния водонасыщенности поверхности техногенных массивов с применением автоматизированных спутниковых систем в обеспечении промышленной и экологической безопасности горнотехнических объектов.

Методика

В Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук в рамках комплексных междисциплинарных фундаментальных исследований [18] разработан новый метод дистанционной площадной гидрогеомеханической съемки и определения степени водонасыщенности поверхности техногенных массивов с помощью машинного зрения, заключающийся в использовании мультиспектральных оптико-электронных спутниковых систем Sentinel-2 (рис. 1) путем комбинации ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов электромагнитного спектра на основе стандартизованного нормализованного разностного водного индекса Normalized Difference Moisture Index (NDMI).

Космические аппараты (КА) Sentinel-2 L2A оснащены камерой MSI с 12 каналами (RGB + NIR + SWIR), имеющей комбинированное разрешение 10/20 м и производящей съемку в видимом/инфракрасном режимах [19] соответственно. Данные системы проходят ежегодную регламентную проверку и сертификацию на точность и достоверность геоданных. Сбор и обработка космоснимков производится с помощью программ SNAP, Sentinel Hub EO Browser, ArcGIS / Esri / QGIS и Google Earth.

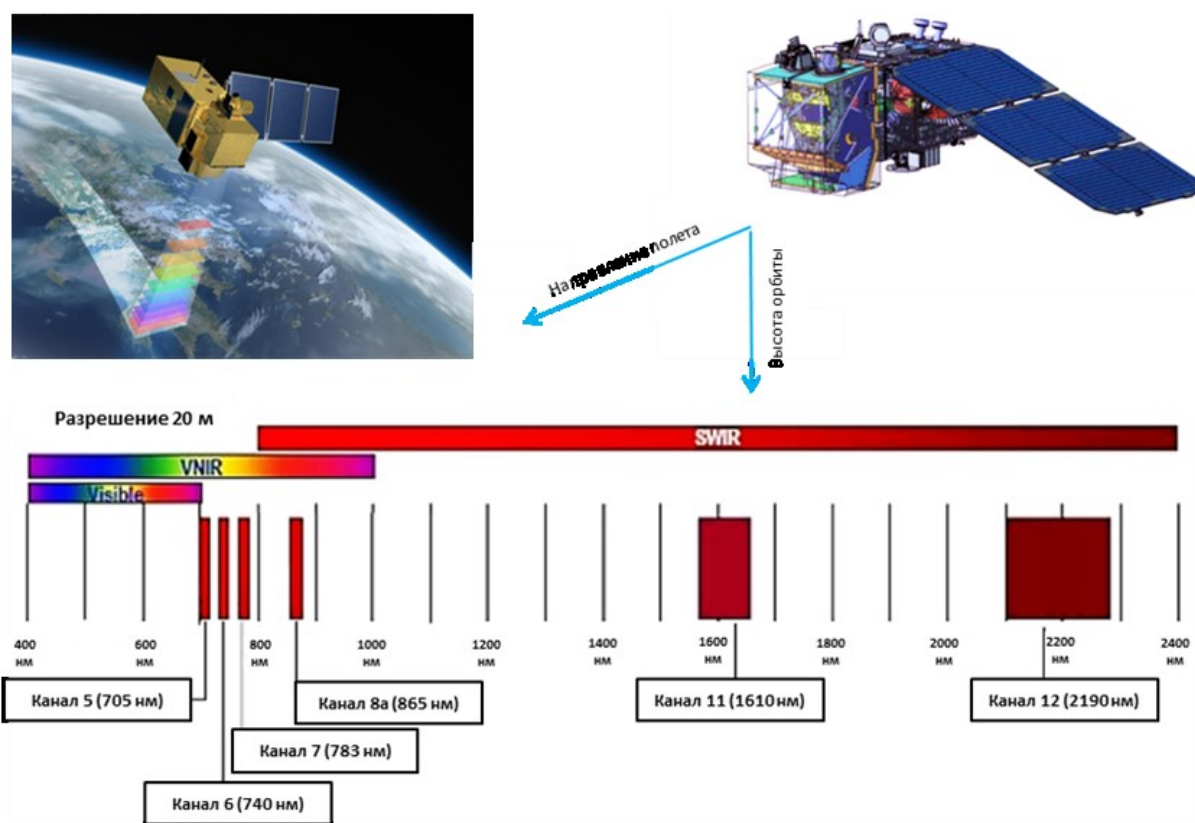


Рис. 1. Общий вид и спектральные характеристики съемочной аппаратуры космических аппаратов Sentinel-2 [19]

В решении поставленной задачи использовался критерий NDMI, позволяющий определить содержание воды и стресс-состояние исследуемого объекта. Расчет показателя NDMI осуществлялся с помощью ПО с открытым исходным кодом. Справочный диапазон значений NDMI составляет от -1 до 1 ед., где отрицательные значения ($NDMI = 0 \div -1$ ед.) соответствуют неводонасыщенным (сухим) средам и, наоборот, положительные значения ($NDMI = 0 \div 1$ ед.) соответствуют водонасыщенным средам. В прикладном значении данный показатель может характеризовать степень водонасыщенности поверхности грунтов и их склонность к развитию и проявлению опасных явлений (фильтрации, суффозии, оплывины, оползни, просадки, выветривание, пыление и т. д.).

Формула расчета NDMI в зависимости от спутниковых систем [20]:

$$\text{Sentinel-2: } NDMI = (B08 - B11) / (B08 + B11); \quad (1)$$

$$\text{Landsat 4-5: TM } NDMI = (B04 - B05) / (B04 + B05); \quad (2)$$

$$\text{Landsat 7: ETM} + NDMI = (B04 - B05) / (B04 + B05); \quad (3)$$

$$\text{Landsat 8: } NDMI = (B05 - B06) / (B05 + B06); \quad (4)$$

$$\text{MODIS: } NDMI = (B02 - B06) / (B02 + B06), \quad (5)$$

где B_n — стандартные обозначения спектральных каналов электромагнитного спектра съемочной аппаратуры.

В процессе спутниковых наблюдений осуществляется идентификация и картирование выявленных зон с разной степенью водонасыщенности на поверхности техногенных массивов на основе их отражательной способности по границам отличенных сред в зависимости от содержания воды в грунтах с учетом реальных местных особенностей. Выполняется комплексный анализ исходных

данных инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, который включает визуальные, полевые и лабораторные результаты исследований, а также результаты камеральной обработки гидрогеологических данных по содержанию и распределению воды в грунтах. Дешифрование и геопространственный анализ спутниковых данных выполнен с использованием визуализированных и автоматизированных методов на основе разработанной классификации грунтов по степени водонасыщенности, приведенной в таблице. Производится автоматическое построение и визуализация изображений в выбранной области по заданным параметрам съемки посредством использования встроенных программных алгоритмов и инструментария. Выполняется геометризация и оконтуривание исследуемого объекта на основе автоматических расчетов и статистического анализа показателя NDMI с определением диапазона его значений в пределах выделенных границ площади территории в указанный период времени. Проводится обобщенный интегрированный анализ и проверка спутниковых данных посредством их сопоставления с результатами выборочного лабораторного отбора проб грунтов с определением точек их географического местоположения и с другими натурными данными, а также совмещения оптических и инфракрасных космоснимков с целью повышения их надежности и достоверности.

Классификация грунтов по водонасыщенности на основе индекса NDMI

№	Значения NDMI	Типы грунтов
1	$0,2^* \div 1$	Водонасыщенные
2	$-0,2^* \div 0,2^*$	Средней водонасыщенности
3	$-0,2^* \div -1$	Неводонасыщенные (сухие)

* Условный эмпирический показатель (для условий апатит-нефелиновых месторождений $NDMI = -0,3 \div 0,96$; где при $NDMI > 0,24$ и $< -0,26$ существуют риски развития гидрогеомеханических фильтрационно-деформационных и геологических экзогенных процессов соответственно).

Результаты и обсуждение

Практическая реализация подходов и методов показана на примере хвостохранилищ апатит-нефелиновых горных предприятий на территории Мурманской области.

Мультиплощадная дистанционная спутниковая съемка хвостохранилищ АНОФ-2 и АНОФ-3 АО «Апатит» (рис. 2) выполнена с помощью КА Sentinel-2 L2A (с учетом атмосферной коррекции данных) с целью изучения степени водонасыщения техногенных намывных откосов и выявления признаков возможных поверхностных проявлений экзогенных геологических процессов в обеспечении промышленной безопасности гидротехнических сооружений. Площадь обследования составила: АНОФ-2 и АНОФ-3 — 5 350 000 и 8 700 000 м² соответственно. В общей сложности собрано и проанализировано 264 космоснимка среднего и высокого пространственного разрешения в режиме облачности до 10 %.

По результатам спутниковых наблюдений посредством интерпретации космоснимков на основе показателя NDMI и обобщенного сравнительного интегрированного анализа разносторонних данных были установлены закономерности в динамике изменения площади и состояния техногенных намывных откосов хвостохранилищ по степени водонасыщенности. Были определены точные периоды сезонного обнажения откосов и наиболее стрессовые ситуации на рассматриваемых объектах. Сезонное обнажение техногенных намывных откосов хвостохранилищ происходит в мае-сентябре, а в другие (зимние) месяцы они находятся в заснеженном состоянии. Период снеготаяния характеризуется резким и интенсивным обнажением большей части поверхности откосов хвостохранилищ со снижением их стабильного и устойчивого состояния. Максимальные значения показателя площади обнаженных откосов хвостохранилищ относятся ко второй половине летнего периода (июль-август). Примечательно, что наиболее негативное воздействие экзогенных процессов на близлежащие населенные пункты происходит непосредственно в это время года. На основе данных мониторинга в отдельных секторах исследуемых сооружений выявлены и идентифицированы признаки и механизмы формирования локальных зон водного стресса

(зон пониженного или повышенного стресса, т. е. сильно или недостаточно увлажненных зон соответственно). Проявление первых способствует развитию опасных фильтрационно-деформационных (суффозий, просадок, оплывин и т. д.), а вторых — экзогенных (в частности, пыления частиц минеральных отходов) процессов и явлений.

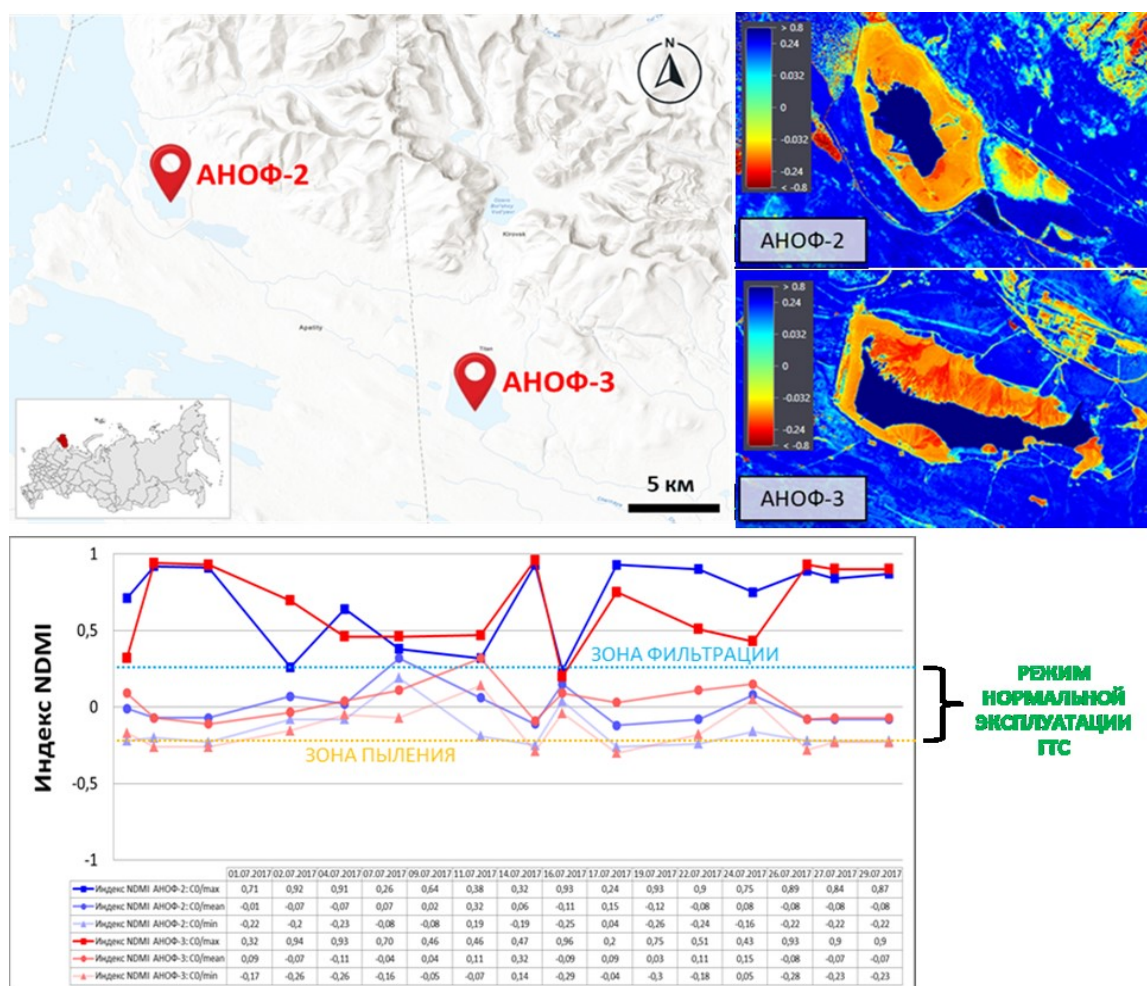


Рис. 2. Результаты мониторинга и оценки степени водонасыщенности техногенных массивов на примере хвостохранилищ апатит-нефелиновых горных предприятий с помощью спутниковых систем Sentinel-2 на основе индекса NDMI

Динамика изменения состояния техногенных намывных откосов по степени водонасыщенности на рассматриваемых хвостохранилищах на основе показателя NDMI представлена на рис. 2. и отображает закономерности сезонных колебаний водонасыщенности грунтов. Результаты оценки степени водонасыщенности техногенных намывных откосов хвостохранилищ имеют высокую сходимость и корреляцию между собой по выбранному критерию, включая данные выборочного отбора проб грунтов.

Закключение

В рамках исследования разработаны новый подход и метод к дистанционной интеллектуальной площадной съемке различных техногенных массивов (карьеров, хвостохранилищ, отвалов, дамб, плотин и др.) с использованием мультиспектральных инфракрасных оптико-электронных спутниковых систем путем автоматизированного дешифрования и геопространственного анализа космоснимков

с помощью машинного зрения на основе критерия, характеризующего стресс-состояние поверхности исследуемых объектов по содержанию воды. Приведена классификация грунтов по водонасыщенности на основе стандартизованного нормализованного разностного водного индекса для оперативной площадной оценки состояния поверхности техногенных грунтов. На примере действующих горных предприятий в Арктической зоне РФ показаны опыт и результаты космического мониторинга хвостохранилищ в задачах контроля и диагностики с целью выявления и идентификации зон с разной степенью водонасыщенности грунтов. Подход может быть успешно применен на других промышленных объектах. Результаты спутниковых наблюдений могут способствовать повышению эффективности защитных мероприятий и рациональному использованию ресурсов в принятии правильных и эффективных управленческих решений на горном предприятии в обеспечении нормального режима эксплуатации инженерных сооружений при борьбе с опасными экзогенными геологическими процессами и явлениями.

Список источников

1. Калашник А. И. Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. 2020. № 9. С. 101–106. doi: 10.17580/gzh.2020.09.15.
2. 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. Vol. 61 (1 P. 155–164. <https://doi.org/10.1134/S1062739125010168>.
3. Kalashnik N. A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam // Journal of Physics Conference Series. 2022. Vol. 2388, No. 1. Article 012149. doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012149.
4. WMTF: World Mine Tailings Failures—from 1915 [Электронный ресурс]. URL: <https://worldminetailingsfailures.org/> (дата обращения: 15.11.2025).
5. Zare M., Nasategay F., Gomez J. A., Far M. A., Sattarvand J. Review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems // Minerals. 2024. 14 (6). 551. <https://doi.org/10.3390/min14060551>.
6. Franks D., Stringer M., Torres-Cruz L., Baker E. Tailings facility disclosures reveal stability risks // Scientific Reports. 2021. March. 11 (1). doi:10.1038/s41598-021-84897-0.
7. 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. Vol. 11, No. 1. P. 249–289. <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>.
8. Clarkson L., Williams D. Critical review of tailings dam monitoring best practice // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020. Vol. 34, Iss. 2. P. 119–148. doi:10.1080/17480930.2019.1625172.
9. Амосов П. В., Бакланов А. А., Горячев А. А., Кони́на О. Т., Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А., Ригина О. Ю., Светлов А. В. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 170 с. doi:10.37614/978.5.91137.505.8.
10. Мелихов М. В. Особенности геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных природно-технических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 12–1. С. 29–41. doi: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_29.
11. Girija R., Mayappan S. Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques // International Journal of Image and Data Fusion. 2019. Vol. 10: 2. P. 79–106. doi: 10.1080/19479832.2019.1589585.
12. Loginov D. S. Web technologies in cartographic support of geological exploration // Proceedings of the 30th International Cartographic Conference (ICC 2021), 14–18 december 2021, ICA, 2021, Vol. 4 (68). doi: 10.5194/ica-proc-4-68-2021.
13. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas // Environmental Research and Public Health. 2020. 17 (6). P. 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061846>.
14. Werner T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing // The Extractive Industries and Society. 2019. Vol. 6, Iss. 3. P. 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>.
15. 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. Vol. 10, No. 9. P. 1392. doi:10.3390/rs10091392.
16. Мелихов М. В. Мультиплощадной космический мониторинг хранилищ отходов горного производства в Арктике // Горная промышленность. 2024. № 5S. С. 21–27. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-21-27>.
17. Мелихов М. В. Геоинформационное обеспечение складирования горнопромышленных отходов на основе космических и цифровых технологий // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции

«Цифровые технологии в горном деле» (г. Апатиты, 13–16 июня 2023 г.). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. С. 32–33. doi:10.37614/978.5.91137.491.4.

18. 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: КНЦ РАН, 2022. 313 с. doi:10.37614/978.5.91137.465.5.
19. Sentinel-2 mission guide [Электронный ресурс]. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения: 15.11.2025).
20. Normalized Difference Moisture Index (NDMI) [Электронный ресурс]. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndmi/> (дата обращения: 15.11.2025).

References

1. Kalashnik A. I. Comprehensive research and monitoring of tailings storage facilities of mining enterprises in the Kola region. *Mining Journal*, 2020, no. 9, pp. 101–106. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2020.09.15.
2. 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, vol. 61 (1), pp. 155–164. <https://doi.org/10.1134/S1062739125010168>.
3. Kalashnik N. A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam. *Journal of Physics Conference Series*, 2022, vol. 2388, no. 1, article 012149. doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012149.
4. WMTF: World Mine Tailings Failures—from 1915. Available at: <https://worldminetailingsfailures.org/> (accessed 15.11.2025).
5. Zare M., Nasategay F., Gomez J. A., Far M. A., Sattarvand J. Review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems. *Minerals*, 2024, 14 (6), 551. <https://doi.org/10.3390/min14060551>.
6. Franks D., Stringer M., Torres-Cruz L., Baker E. Tailings facility disclosures reveal stability risks. *Scientific Reports*, 2021, march, 11 (1). doi:10.1038/s41598-021-84897-0.
7. 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, vol. 11, no. 1, pp. 249–289. <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>.
8. Clarkson L., Williams D. Critical review of tailings dam monitoring best practice. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2020, vol. 34, issue 2, pp. 119–148. doi:10.1080/17480930.2019.1625172.
9. Amosov P. V., Baklanov A. A., Goryachev A. A., Konina O. T., Krasavtseva E. A., Makarov D. V., Masloboev V. A., Rigina O. Yu., Svetlov A. V. *Dusting of apatite-nepheline ore beneficiation tailings: an environmental problem and ways to solve it*. Apatity, FRC KSC RAS, 2023, 170 p. (In Russ.). doi:10.37614/978.5.91137.505.8.
10. Melikhov M. V. Features of geoinformation space monitoring of mining natural-technical systems. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2022, no. 12–1, pp. 29–41. (In Russ.). doi:10.25018/0236_1493_2022_121_0_29.
11. Girija R., Mayappan S. Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2019, vol. 10: 2, pp. 79–106. doi:10.1080/19479832.2019.1589585.
12. Loginov D. S. Web technologies in cartographic support of geological exploration. *Proceedings of the 30th International Cartographic Conference (ICC 2021)*, Florence, Italy: The International Cartographic Association (ICA), 2021, vol. 4 (68). doi: 10.5194/ica-proc-4-68-2021.
13. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas. *Environmental Research and Public Health*, 2020, 17 (6), p. 1846. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061846>.
14. Werner T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*, 2019, vol. 6, issue 3, pp. 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>.
15. 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, vol. 10, no. 9, pp. 1392. doi:10.3390/rs10091392.
16. Melikhov M. V. Multi-area space monitoring of mining waste storage facilities in the Arctic. *Mining Industry*, 2024, no. 5S, pp. 21–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-21-27>.
17. Melikhov M. V. Geoinformation support for mining waste storage based on space and digital technologies. *Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference “Digital Technologies in Mining”*. Apatity, Federal Research Center of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2023, pp. 32–33. (In Russ.). doi:10.37614/978.5.91137.491.4.

18. Kalashnik A. I., Maksimov D. A., Kalashnik N. A., Dyakov A. Yu., Zaporozhets D. V., Melikhov M. V. *Multilevel integrated studies and monitoring of tailings ponds of mining enterprises in the Northwestern part of the Russian sector of the Arctic*. Apatity, KSC RAS, 2022, 313 p. (In Russ.). doi: 10.37614/978.5.91137.465.5.
19. Sentinel-2 mission guide. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed 15.11.2025).
20. Normalized Difference Moisture Index (NDMI). Available at: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndmi/> (accessed 15.11.2025).

Информация об авторе

М. В. Мелихов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

M. V. Melikhov — Candidate of Science (Tech.), Senior Research Fellow.

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 05.12.2025.
The article was submitted 28.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 05.12.2025.