

ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 001.57, 528.8, 622, 626/627

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ДИСТАНЦИОННОМУ МОНИТОРИНГУ ГОРНО-ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. В. Мелихов, А. И. Калашник, С. П. Остапенко, Е. Ю. Лебедик

Горный институт КНЦ РАН,

E-mail: m.melikhov@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия

Рассмотрены актуальные проблемы и особенности эксплуатации промышленных горно-гидротехнических объектов в Арктической зоне РФ. Разработан комплексный методический подход к дистанционному обследованию и мониторингу в режиме реального времени сопряженных горно-гидротехнических сооружений и особо охраняемых природных территорий на основе современных космических и цифровых технологий. Прогноз и управление техногенными рисками осуществлены путем создания цифровых двойников и информационных карт рисков с ранжированием объектов по степени опасного воздействия на основе обобщения пространственных данных, полученных при построении геофильтрационной 3D-модели массива и гидрогеомеханического моделирования формирующихся фильтрационно-деформационных процессов, а также дешифрования и анализа космоснимков районов промышленного загрязнения территориальных вод и приземного слоя атмосферы. Представлены результаты геофильтрационного 3D-моделирования гидротехнического сооружения. Показаны эффективные способы удаленной оценки и контроля за состоянием горно-гидротехнических объектов и водных акваторий с помощью методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Приведены результаты исследований в горнопромышленном регионе аэротехногенного воздействия на окружающую среду.

Арктика, горная промышленность, гидротехнические сооружения, промышленная и экологическая безопасность, особо охраняемые природные территории, техногенные риски, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, 3D-моделирование, пространственные данные

DOI: 10.15372/FTPRI20250116

EDN: VMHOER

В мировой практике горного дела проблематика исследований в области контроля и мониторинга горно-гидротехнических объектов обусловлена существованием высоких рисков техногенных катастроф, связанных с прорывами ограждающих дамб и плотин, загрязнением особо

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-20013).

охраняемых территорий промышленными водами и вредными веществами, поступающими из атмосферы [1–3]. В Арктической зоне РФ рассматриваемые инженерные сооружения представляют собой динамически изменяющиеся технические комплексы гигантских размеров промышленного назначения для размещения минеральных отходов горного производства в сопряженной природно-техногенной водной среде [4]. Большинство объектов в регионе спроектированы в непосредственной близости с особо охраняемыми природными территориями, имеют недостаточно надежную и безопасную конструкцию и эксплуатируются порядка 10–50 лет.

Конструкция данных сооружений — многослойная структура из насыпных и намывных грунтов на прочном основании из коренных пород с водно-ледниковыми и органическими включениями, которая не предусматривает инженерной защиты на основе противofiltrационных материалов для стабилизации грунтов и достижения максимального уровня безопасности объектов. Особенности их обслуживания и диагностики являются сложные горно-гидрогеологические и климатические условия, удаленность и большие занимаемые площади территории, а также технические ограничения традиционных систем контроля и наблюдений.

В характерных специфических условиях отмечается относительно быстрое изменение физико-механического и гидро-геомеханического состояния вмещающих грунтов во времени, сопровождаемое зарождением опасных фильтрационно-деформационных и эрозионных процессов в локально неоднородных и неустойчивых зонах грунтов и минеральных отложений, первоначально скрытых от визуальных и наземных средств и систем наблюдений [5–7]. Поверхностные слои намывных отходов при негативном сочетании комплекса факторов могут находиться в нестабильном состоянии и подвергаться сезонным процессам физического выветривания и пыления, приводящим к загрязнению природных водных ресурсов. Опасные изменения механической и фильтрационной устойчивости сооружений и снижение их промышленной и экологической безопасности проявляется в виде периодических загрязнений близкорасположенных экосистем и повышенной запыленности мелкодисперсными частицами приземного слоя атмосферы [8, 9].

Одно из перспективных научно-технических решений проблемы — комплексное применение инновационных космических и цифровых технологий в обеспечении эффективного контроля и управления потенциально опасными объектами посредством имитационного моделирования и компьютерного зрения в идентификации физических процессов, а также дистанционного и автоматизированного получения в режиме реального времени необходимой геопро странственной информации для своевременного прогноза техногенных рисков и предотвращения возможных аварий [10–19].

Цель исследований — разработка комплексного подхода к дистанционному мониторингу промышленных районов совместного размещения горно-гидротехнических сооружений и особо охраняемых природных территорий на основе современных космических и цифровых технологий для прогноза и управления техногенными рисками путем создания виртуальных двойников и информационных карт с ранжированием объектов по степени опасного воздействия на окружающую среду.

Задачами исследований являлись:

- построение компьютерной геофильтрационной 3D-модели массива пород и гидрогеомеханическое моделирование фильтрационно-деформационных процессов для прогноза формирующихся зон повышенного гидростатического напора и фильтрации в сопряженных с контролируемым горно-гидротехническим сооружением природно-технических водных средах;
- дистанционная оценка и контроль состояния горно-гидротехнических сооружений для выявления и отслеживания опасных фильтрационных процессов и промышленных сбросов на поверхности акватории природных водных ресурсов;

— дистанционная оценка и контроль аэротехногенного загрязнения атмосферы и территории горнопромышленных регионов отходами переработки минерального сырья в зависимости от дальности ветрового переноса тонкодисперсных отходов.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Горный институт КНЦ РАН с 1990-х годов прошлого века работает над решением проблемы, связанной с развитием систем мониторинга горных объектов и территорий для обеспечения их промышленной и экологической безопасности в Арктике [20–23]. Благодаря многолетнему опыту, разработаны основы технического обследования и мониторинга различных промышленных горнотехнических систем. Внедрены на ряде опасных объектов методические подходы, ориентированные на высокоточные информационные системы дистанционного и автоматизированного контроля на базе высоких и цифровых технологий. В основу научных приемов положен принцип комплексирования и интеграции многоуровневых пространственных геоданных и их интерактивного геопро пространственного анализа. Сбор и интерпретация пространственных данных выполняются с помощью прикладных программных продуктов со встроенными системой глобального позиционирования и функциями искусственного интеллекта. Разработанные подходы и компьютерные модели позволяют с учетом многоуровневой геопро пространственной информации всесторонне оценить потенциальные риски в обеспечении промышленной безопасности водных объектов капитального строительства. Эффективность применяемых методов подтверждена на ряде крупных горных предприятий: Фосагро, Акрон, ЕвроХим, Северсталь и др.

Разработан и апробирован новый комплексный подход (рис. 1) к дистанционному мониторингу горно-гидротехнических объектов в сопряженной природно-техногенной водной среде, основанный на применении современных космических и цифровых технологий. Цель исследований достигается путем комбинирования методов компьютерного геофильтрационного 3D-моделирования и автоматизированных оптико-электронных систем ДЗЗ. Выбор определенной вариации программных продуктов и съемочного инструментария может изменяться в зависимости от конкретных задач и местных условий наблюдений. При проведении исследований использовались программные комплексы и ГИС: MODFLOW 8, 3D Groundwater Explorer, SNAP, Sentinel Hub EO Browser и Google Earth. Дистанционные наблюдения выполнялись на базе спутниковых систем Sentinel-2 и 3.

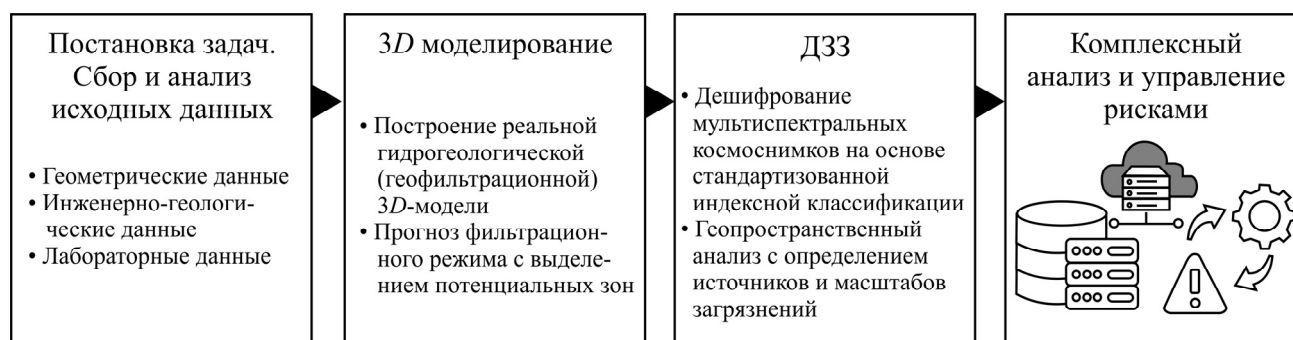


Рис. 1. Методический подход к дистанционному мониторингу горно-гидротехнических объектов на основе космических и цифровых технологий

Компьютерное геофильтрационное 3D-моделирование заключается в воспроизведении цифрового двойника горно-гидротехнического объекта на основе интерпретации различных моделей развития процессов фильтрации грунтовых вод и связанных с ними явлений для обеспечения

печения наиболее эффективного решения гидрогеологических задач. Выполняется численное моделирование развития процессов геофильтрации с использованием конечно-разностного метода решения дифференциальных уравнений с сеточной разбивкой области фильтрации воды. Гидростатический напор и коэффициенты фильтрации — основные исходные гидродинамические параметры данных уравнений. Количество уравнений соответствует числу блоков сеточной разбивки. Численное моделирование осуществляется посредством решения уравнений фильтрации с учетом заданных граничных условий и структуры фильтрационного поля. При решении задачи проводится построение геофильтрационной и гидрогеомеханической 3D-моделей объекта и вмещающего массива в пределах горного отвода, а также моделирование формирующихся фильтрационно-деформационных процессов. 3D-модели объекта создаются с учетом реальных геометрических, инженерно-геологических и гидрологических условий. Отличительная особенность создаваемых 3D-моделей — возможность реализации совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, разность напоров), гидродинамические (образование водотоков, скорость и давление потока) и геомеханические (деформации и смещения грунтов под действием силы тяжести, а также вследствие гидростатического и динамического давления воды) условия и нагрузки [24].

Дистанционный мониторинг и обследование примыкающих к горнотехническим объектам водных экосистем заключается в выявлении и отслеживании опасных фильтрационных процессов или промышленных сбросов на поверхности акватории с помощью методов ДЗЗ. В решении данной задачи наиболее эффективны оптико-электронные спутниковые системы, работающие в комбинированном видимом и инфракрасном режимах съемки. Подход реализуется путем сбора и анализа космоснимков для обнаружения повышенных концентраций загрязняющих веществ с использованием стандартизованных индексных критериев оценки качества поверхностных вод на основе отражательной способности (спектральных свойств). С этой целью применяются специальные программные алгоритмы и определенные комбинации спектральных каналов съемочной аппаратуры. В установлении реальных источников и масштабов техногенных аварий проводится обобщенный пространственно-временной анализ данных.

Дистанционный мониторинг запыленности атмосферы в районах эксплуатации горно-гидротехнических комплексов обнаруживает и отслеживает площадное распространение мелкодисперсных частиц отходов минерального сырья с помощью методов ДЗЗ. При идентификации аэротехногенного воздействия на особо охраняемые природные территории и оценки потенциального экологического риска выполняется анализ теплового излучения земной поверхности по данным спутниковых наблюдений.

Прогноз и управление техногенными рисками осуществляется путем создания цифровых двойников и информационных карт с ранжированием объектов по степени опасного воздействия на основе обобщения пространственных данных, полученных по результатам построения реальной гидрогеологической 3D-модели массива и гидрогеомеханического моделирования формирующихся фильтрационно-деформационных процессов, а также дешифрования и анализа космоснимков на основе стандартизованных критериев спектральной площадной классификации районов промышленного загрязнения акватории территориальных вод и приземного слоя атмосферы.

Применение разработанного подхода позволяет удаленно определять и измерять следующие контролируемые параметры на объекте, а также создавать и управлять локальными базами данных на их основе:

- географическое местоположение и геометрические размеры;
- отдельные технологические и конструктивные параметры;
- гидрогеологический режим и прогноз фильтрационно-деформационных процессов;
- техногенное воздействие.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Практическая реализация методического подхода показана на примере апатит-нефелиновых месторождений на территории Мурманской области.

Геофильтрационное 3D-моделирование. На одном из горно-гидротехнических комплексов (рис. 2), предназначенных для складирования минеральных отходов горного производства и расположенного на водоразделе поверхностных и подземных вод, построена геофильтрационная 3D-модель для прогноза фильтрационного режима с помощью программного комплекса Processing Modflow 8. Программа использует блочно-центрированный балансовый метод конечных разностей для расчета трехмерного и неоднородного по фильтрационным свойствам водного потока. В решении задачи выбран итерационный метод сопряженных градиентов. Расчетная геофильтрационная 3D-модель тела и основания ограждающей дамбы хвостохранилища разработана на основе обобщения и схематизации исходных данных. Протяженность моделируемой области 4515×8131 м. Геометрические размеры 3D-модели: ширина 160, длина 600 и высота 53 м. 3D-модель объекта включает: 300 строк, 500 столбцов и 4 слоя. Коэффициент фильтрации определяется для каждого инженерно-геологического слоя в отдельности.

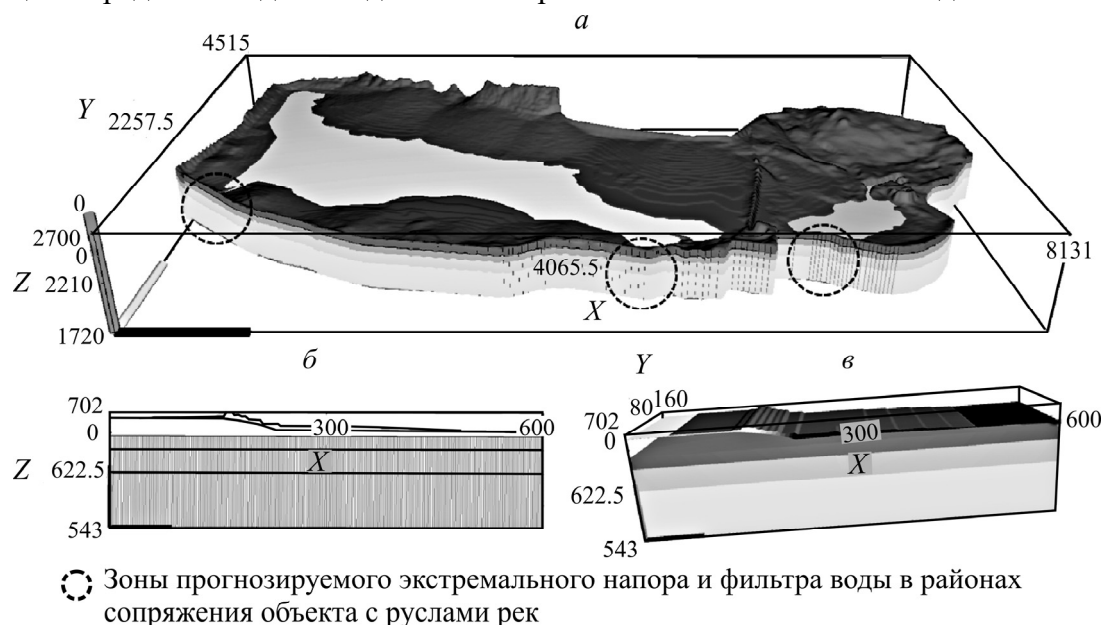


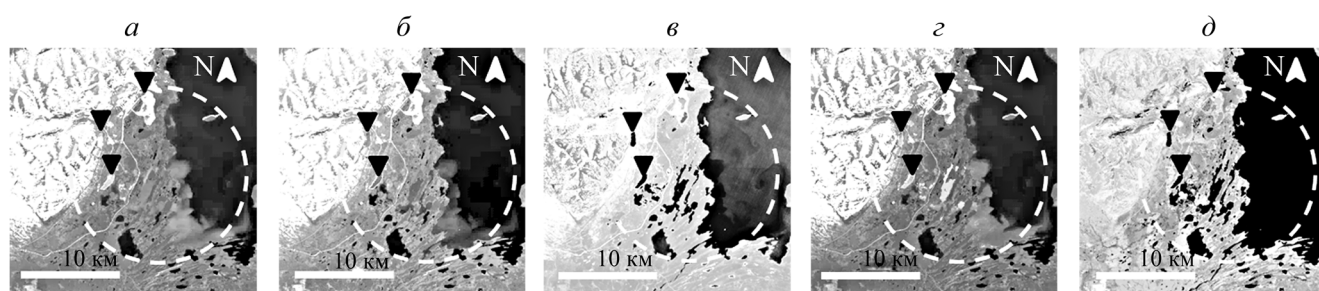
Рис. 2. Геофильтрационное 3D-моделирование гидротехнического комплекса в горнопромышленном районе Арктической зоны РФ (А. И. Калашник, Е. Ю. Лебедик, 2024): *a* — геофильтрационная 3D-модель; *б, в* — разрез и 3D-модель конструкции инженерного сооружения

Режим фильтрации структурных слоев принимается напорно-безнапорным в зависимости от расчетного положения уровня воды в конкретной ячейке. При моделировании ведется подсчет грунтовых вод, а положение поверхности вод определяется с учетом суммарного значения

их уровней. Задача решается в стационарной постановке. Трехмерная визуализация результатов моделирования проводилась с помощью программы 3D Groundwater Explorer. При калибровке 3D-модели использованы данные рекогносцировочного и визуального обследования, а также инженерно-геологические, гидрологические и геофизические данные. Результаты геофильтрационного 3D-моделирования позволяют визуализировать положение уровней воды при оценке реального технического состояния объекта, а также прогнозировать формирование локальных зон повышенного гидростатического напора и фильтрации в сопряженных природно-технических водных средах.

Мониторинг акватории водных ресурсов. На примере горно-гидротехнических комплексов, представляющих собой хранилища горных отходов и накопители (отстойники) промышленных вод, проведены ретроспективные исследования акватории озер в районе возникновения техногенной аварии с помощью методов ДЗЗ. Удаленная съемка выполнена на базе оптико-электронных спутниковых систем Sentinel-2, оснащенных мультиспектральной камерой MSI с 12 каналами (RGB+NIR+SWIR) с комбинированным разрешением 10/20 м в видимом/инфракрасном режиме соответственно (рис. 3). Сбор и интерпретация космоснимков проводилась с использованием программ ESA Sentinel Hub EO Browser и Google Earth. В качестве инструмента качественной оценки состояния акваторий выбрана группа следующих стандартизованных критериев (водных индексов): 1) True color composite (комбинация красной, зеленой и синей части спектра, или RGB), 2) False color (комбинация ближнего инфракрасного спектрального диапазона с красным и зеленым диапазонами), 3) Normalized Difference Water Index или NDWI (комбинация зеленого и ближнего инфракрасного диапазона), 4) Ulyssys Water Quality Viewer, или UWQV (алгоритмическая комбинация однополосной отражательной способности и нормализованного дифференциального индекса воды) и 5) Short-Wave InfraRed, или SWIR (коротковолновый инфракрасный диапазон).

По результатам сравнительного анализа космоснимков, обработанных с использованием водных индексов, определены наиболее эффективные способы и методы удаленной визуализации в реальном времени повышенных концентраций взвешенных частиц в акватории озер, а также мониторинга горно-гидротехнических сооружений с идентификацией сбросов металлосодержащих вредных веществ (в частности, алюминийсодержащие отложения наиболее выражено наблюдаются на основе их однополосных отражательных способностей в диапазоне 620–700 нм электромагнитного спектра) в окружающую среду.



▼ Местоположение горно-гидротехнических сооружений ⬤ Район произошедшей техногенной аварии

Рис. 3. Результаты сравнительного анализа космоснимков района техногенной аварии, полученных с использованием различных стандартизованных индексных критериев качественной оценки состояния поверхности водных сред на основе использования программных алгоритмов и комбинации спектральных каналов (М. В. Мелихов, 2024): а — True color composite; б — False color; в — NDWI; з — UWQV; д — SWIR

В районах крупномасштабной добычи полезных ископаемых выполнена качественная оценка состояния водных экосистем (рис. 4) посредством дешифрования мультиспектральных космоснимков ESA Sentinel-2 с использованием индекса UWQV. На основе пространственно-временного анализа данных ДЗЗ идентифицированы потенциально опасные объекты и возможные источники промышленных загрязнений, а также определены масштабы и риски техногенных аварий. Достоверность данных ДЗЗ коррелирует с результатами геохимического анализа, подтверждающего содержание высоких концентраций металлосодержащих элементов в составе проб воды, взятых по факту сброса вредных веществ в окружающую среду. Метод может быть адаптирован и использован в задачах геомониторинга загрязнений водных ресурсов нефтепродуктами, пластиком и другими бытовыми отходами.

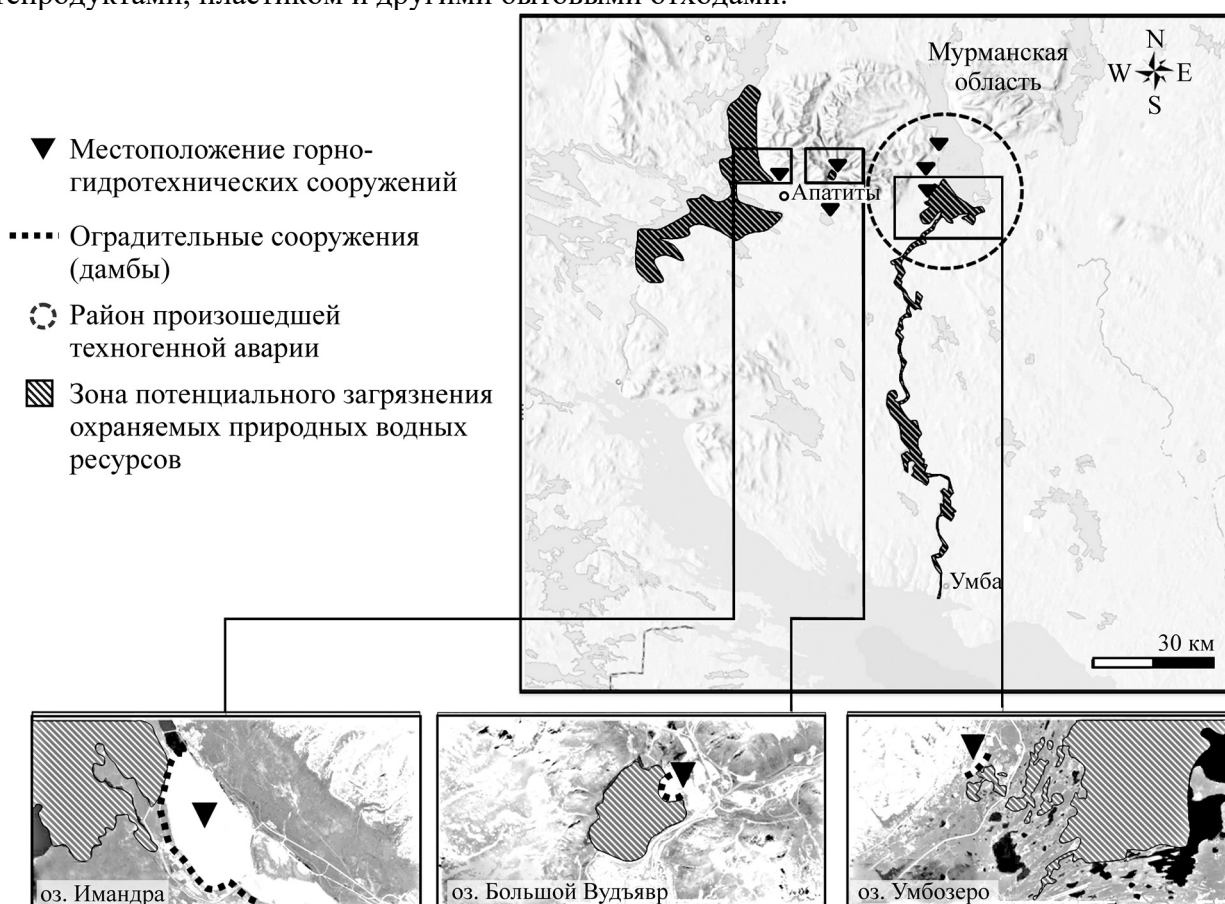


Рис. 4. Карта техногенных рисков и результаты мониторинга особо охраняемых природных водных ресурсов в горнопромышленном районе Арктической зоны РФ на основе космических и цифровых технологий (М. В. Мелихов, 2024)

Мониторинг аэротехногенного загрязнения. Новый подход к удаленной оценке площадного аэротехногенного воздействия на окружающую среду разработан на примере горно-гидротехнического комплекса, расположенного в непосредственной близости от границы национального природного парка “Хибины”. Установлено, что наименьшая дисперсия оценки аэрозольного загрязнения атмосферы минеральным сырьем достигается при его характеристике разностью яркостной температуры в спутниковых каналах, регистрирующих тепловое излучение земной поверхности на длине волны 11 и 12 мкм. Расчет спектрального индекса аэротехногенного загрязнения проводился обработкой изображений, полученных с помощью космиче-

ских аппаратов ESA Sentinel-3, оснащенных мультиспектральной камерой SLSTR с 9 каналами 0.555–12 мкм с разрешением 500–1000 м. Обработка космоснимков осуществлялась программой ESA SNAP с учетом изменений содержания влаги в атмосферном столбе в разных частях исследуемой территории. Поле аэротехногенного загрязнения исследовалось по пространственной корреляции спектрального индекса расчетом экспериментальных вариограмм по направлениям основных и четверных румбов. Для расчета вариограмм на исследуемой территории выделялись мониторинговые полигоны, а в обеспечении представительности данных для каждого полигона проводилось усреднение по ~200 точкам наблюдения, соответствующим пикселям спутникового изображения (рис. 5а и б). При усреднении данных наблюдений и расчете вариограмм использовался программный пакет статистической обработки данных R.

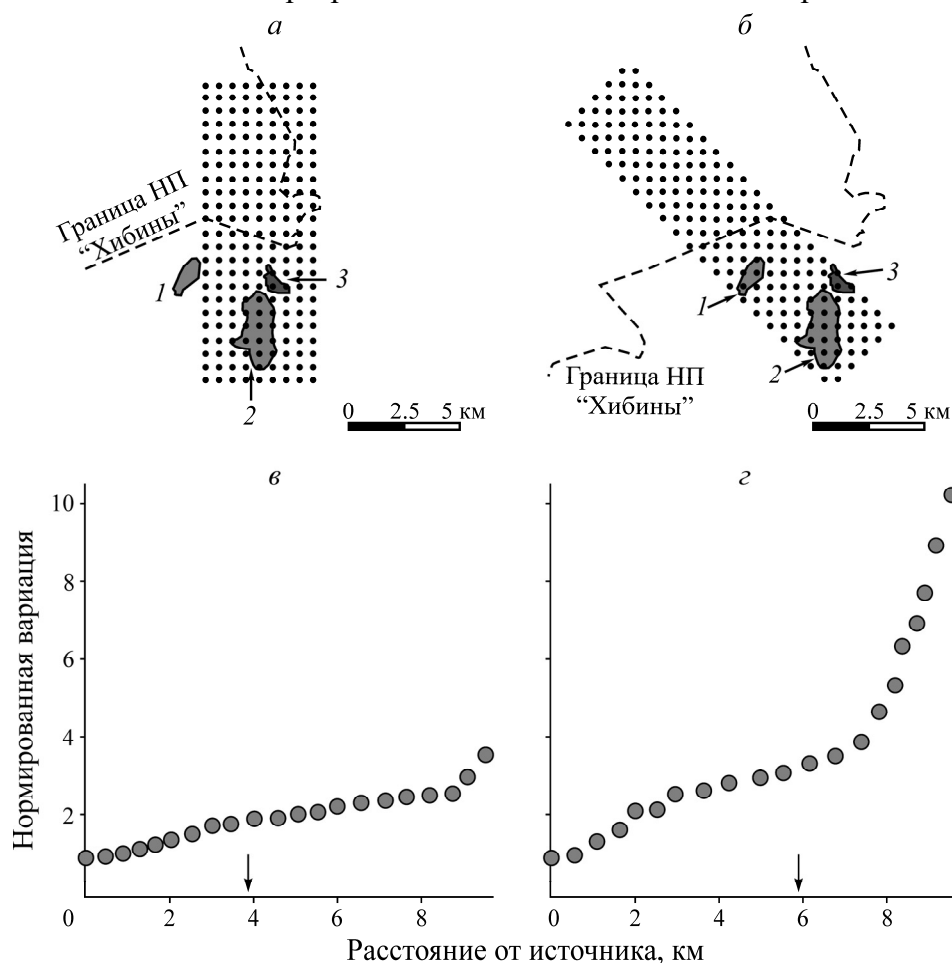


Рис. 5. Результаты оценки аэротехногенного воздействия горно-гидротехнического комплекса в районе национального парка “Хибины” в горнопромышленном районе Арктической зоны РФ (С. П. Остапенко, 2024): а, б — схемы расположения мониторинговых точек в северном и северо-западном направлениях от объекта исследований соответственно; в, г — экспериментальные вариограммы спектрального индекса аэрозольного загрязнения в северном и северо-западном направлениях соответственно; ↓ — расстояние от объекта исследований до границы национального природного парка; 1 — карьер; 2 — хвостохранилище; 3 — озеро

В результате проведенных исследований установлено распространение аэрозольного загрязнения отходами переработки минерального сырья в северном и северо-западном направлениях от источника загрязнения вглубь территории национального природного парка на расстояние от 2 до 4 км. Воздействие выявлено переходом от монотонного к резкому увеличению

вариации спектрального индекса, характеризующего аэрозольное загрязнение, с удалением от источника (рис. 5б и г). Показано, что из-за сглаживания влияния неоднородностей подстилающей поверхности не происходит изменения чувствительности результата обработки космоснимков к наличию аэрозольного загрязнения. Так, на вариацию спектрального индекса не оказывает влияние наличие небольшого озера (площадью $\sim 0.7 \text{ км}^2$), расположенного в северном направлении от хвостохранилища (рис. 5б). Ведение открытых горных работ к северо-западу от хвостохранилища сопровождается аэрозольным загрязнением, что проявляется изменением наклона линии вариограммы спектрального индекса аэрозольного загрязнения на удалении 2.5 км от хвостохранилища, соответствующего расположению карьера (рис. 5г). Данные дистанционной оценки дальности распространения аэрозольного загрязнения ($\sim 4 \text{ км}$) хорошо согласуются с результатами расчетного моделирования распространения пыли при ведении буровзрывных работ на карьере ($\sim 3 \text{ км}$), приведенными в ранее выполненных исследованиях [25].

Представленный методический подход с использованием данных ДЗЗ к удаленной оценке площадного развития аэротехногенного воздействия не нуждается в проведении полевых наблюдений и позволяет идентифицировать аэрозольное загрязнение приземного слоя атмосферы отходами горного производства в горнопромышленных регионах.

ВЫВОДЫ

Предложен комплексный методический подход на основе современных космических и цифровых технологий к дистанционному мониторингу в режиме реального времени сопряженных горно-гидротехнических объектов и особо охраняемых природных территорий в Арктической зоне РФ. Подход применяется с целью прогноза и управления техногенными рисками путем создания цифровых двойников и информационных карт с ранжированием объектов по степени воздействия на окружающую среду. Задача решается путем комбинирования современных методов компьютерного 3D-моделирования и автоматизированных оптико-электронных систем ДЗЗ. На примере рядом расположенных действующих горных предприятий и особо охраняемых природных территорий (в том числе национального парка “Хибины”) показаны результаты реализации новых эффективных методов и способов дистанционного контроля и прогноза технического состояния горно-гидротехнических комплексов при оценке промышленных и экологических рисков для снижения их вредного влияния на экосистему. Представленные методы целесообразно использовать в составе комплексной системы контроля и управления, причем некоторые из них не требуют обязательных полевых измерений и могут быть адаптированы в других условиях на объектах капитального строительства.

Разработан методический подход к построению компьютерных геофильтрационной и гидрогеомеханической 3D-моделей массива пород, а также моделированию формирующихся в контролируемых объектах опасных фильтрационно-деформационных процессов. 3D-модели объекта создаются имитационным подобием реальных геометрических, инженерно-геологических и гидрологических условий. В них учитываются гидростатические, гидродинамические и геомеханические условия и нагрузки. Результаты моделирования дают возможность прогнозировать формирование локальных зон повышенного гидростатического напора и фильтрации в сопряженных с контролируемым объектом природно-технических водных средах.

Сформулирован методический подход к дистанционной оценке и контролю горно-гидротехнических сооружений для выявления и отслеживания опасных фильтрационных процессов и промышленных сбросов на поверхности акватории охраняемых природных водных ресурсов с использованием методов ДЗЗ. Определены наиболее эффективные способы и методы удаленного обнаружения и локализации повышенных концентраций металлосодержащих вред-

ных веществ на поверхности акватории охраняемых природных водных ресурсов с установлением источников и масштабов техногенных аварий. Данный подход позволяет оценивать и управлять техногенными рисками в районах крупномасштабной добычи полезных ископаемых.

Развит методический подход к дистанционной оценке и контролю аэротехногенного воздействия горно-гидротехнических комплексов на окружающую среду с помощью методов ДЗЗ. Подход позволяет удаленно определять направления и дальность распространения аэротехногенного загрязнения минеральными отходами приземного слоя атмосферы и охраняемых природных территорий, в том числе определять наличие и контролировать аэрозольные загрязнения в районах расположения национальных природных парков и заповедников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **WMTF: World Mine Tailings Failures** — from 1915. [Электронный ресурс]. URL: <https://worldminetailingsfailures.org/>
2. **Franks D., Stringer M., Torres-Cruz L. and Baker E.** Tailings facility disclosures reveal stability risks, *Scientific Reports*, 2021, March., Vol. 11, No. 1.
3. **Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., and Cao J.** A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history, *Adv. Civil Eng.*, 2019, Iss. 1, 4159306.
4. **Архипов А. В., Решетняк С. П.** Техногенные месторождения. Разработка и формирование. — Апатиты: КНЦ РАН. — 2017. — 175 с.
5. **Лолаев А. Б., Бутыгин В. В.** Геоэкологические проблемы промышленной гидротехники в криолитозоне. — М.: Недра, 2005. — 240 с.
6. **Lolaev A., Oganessian A., Oganessian E., and Badoev A.** Estimated monitoring methodology for the tailings dam stability, *Information Technology in Geo-Engineering (ICITG)*, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham, 2019. — P. 644–653.
7. **Glotov V., Chlachula J., Glotova L., and Little E.** Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East, *Eng. Geology*, 2018, Vol. 245. — P. 236–247.
8. **Даувальтер М. В., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Слукровский З. И.** Гидрохимический мониторинг поверхностных вод в зоне влияния деятельности ГОК “Олений ручей” // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. — 2022. — № 19. — С. 80–85.
9. **Амосов П. В., Бакланов А. А., Горячев А. А., Кониная 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. — 168 с.
10. **Hu J. and Xingzong L.** Design and implementation of tailings dam security monitoring system, *Proc. Eng.*, 2011, Vol. 26, No. 5. — P. 1914–1921.
11. **Han Y., Wang G., Zhang X., and Zhao B.** Numerical simulation of seepage surface and analysis of phreatic line control from a fine-grained tailings high stacked dam under complicated geography conditions, *Appl. Sci.*, 2023, Vol. 13, No. 23. — P. 2859.
12. **Yang Y., Zhou X., Chen X., and Xie C.** Numerical simulation of tailings flow from dam failure over complex terrain, *Materials*, 2022, 15(6): 2288.
13. **Хайтао М., Ихай Ч.** Физическое моделирование дамб хвостохранилищ в Китае. Аналитический обзор // ФТПРПИ. — 2022. — № 4. — С. 26–39.
14. **Zare M., Nas1ategay F., Gomez J., Moayedi Far A., and Sattarvand J.** A review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems, *Minerals*, 2024, Vol. 14, Iss. 551.

15. **Lumbroso D., Mcelroy C., Goff C., Roca M., Petkovsek G., and Wetton M.** The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information, *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 2019, August, 38:101209.
16. **Lumbroso D., McElroy C., Goff C., Collell M., Petkovsek G., and Wetton M.** The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information, *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 2019, Vol. 38, 101209.
17. **Clarkson L., Williams D., and Seppälä J.** Real-time monitoring of tailings dams, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2020, Vol. 15, Iss. 2. — P. 113–127.
18. **Slingerland N., Sommerville A., O’Leary D., and Beier N.** Identification and quantification of erosion on a sand tailings dam, *Geosystem Eng.*, 2018, Vol. 23. — P. 131–145.
19. **Remer L., Levy R., and Martins J.** Opinion: aerosol remote sensing over the next 20 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2024, Vol. 24. — P. 2113–2127.
20. **Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В.** Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 3–10.
21. **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.
22. **Мелихов М. В.** Дистанционный мониторинг природных водных ресурсов в зоне строительства горно-гидротехнических комплексов // Система мониторинга в Арктической зоне: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (в рамках проведения XIV Междунар. салона средств обеспечения безопасности “Комплексная безопасность-2023”). — М., 2023. — С. 45–54.
23. **Месяц С. П., Остапенко С. П.** Прогноз техногенного воздействия горнопромышленных предприятий на состояние природной среды по данным спутниковых наблюдений // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 181–187.
24. **Калашник Н. А.** Оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища на основе гидрогеомеханического 3D-моделирования // ГИАБ. — 2022. — № 12-1. — С. 5–15.
25. **Хазинс В. М., Шувалов В. В., Соловьев С. П.** Трехмерное моделирование распространения облака взвешенной пыли за пределами горнорудного карьера при массовых взрывах // ФТПРПИ. — 2024. — № 4. — С. 29–41.

Поступила в редакцию 22/X 2024

После доработки 11/XI 2024

Принята к публикации 23/I 2025