

УДК 622:532:004.9

## ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫХ МЕТОДОВ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОНИТОРИНГЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АРКТИКИ

Калашник А.И.

*Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты,  
e-mail: a.kalashnik@ksc.ru*

Показана актуальность диагностики и мониторинга накопителей жидких промышленных отходов западной части российского сектора Арктики (на примере Мурманской области) как особо ответственных объектов (I–II класс опасности). Разработаны методические основы применения мультидисциплинарных методов для многоуровневых наблюдений в системе мониторинга: гидротехника, гидрогеология, геомеханика, геодезия, геофизика, GPS геодезия, аэрофотосъемка, ДЗЗ, геоинформатика, компьютерное моделирование, цифровые технологии. Многоуровневый мониторинг выполняется на четырех уровнях, соотнесенных с земной поверхностью: спутниковом, воздушном, наземном и подповерхностном (подземном). Спутниковый уровень включает в себя GPS геодезию, обработку и анализ оптических, спектральных и радарных снимков (ДЗЗ). Воздушный уровень базируется на различных видах цифровой аэрофотосъемки. Основу наземного уровня составляют роботизированные геодезические измерения, лазерное и радарное сканирование поверхности накопителей отходов и рельефа. Подземный уровень включает в себя гидрогеологические измерения, сейсмомографию и георадарное зондирование как ограждающих сооружений, так и намывных отложений отходов. На основе полученных натурных результатов создаются гидрогеомеханические 3D модели накопителей и выполняется моделирование формирования и трансформации фильтрационно-деформационных процессов. Такой подход в различном комплексировании мультидисциплинарных методов, как на одном, так и на разных уровнях, позволяет решать задачи мониторинга в иерархии: от накопителя жидких промышленных отходов как объекта в целом (десятки квадратных километров) до отдельных компонентов (километры и сотни метров) и локальных участков (метры и доли метров). Приведены примеры применения мультидисциплинарных методов и цифровых технологий в мониторинге накопителей жидких промышленных отходов горнодобывающих предприятий западной части Арктики (Мурманская область).

**Ключевые слова:** накопитель жидких промышленных отходов, многоуровневый мониторинг, цифровые технологии, западная часть Арктики, Мурманская область

## APPLICATION OF MULTIDISCIPLINARY METHODS AND DIGITAL TECHNOLOGIES IN MONITORING OF LIQUID INDUSTRIAL WASTE STORAGE IN THE WESTERN PART OF THE ARCTIC

Kalashnik A.I.

*Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity,  
e-mail: a.kalashnik@ksc.ru*

The relevance of diagnostics and monitoring of liquid industrial waste accumulators in the western part of the Russian sector of the Arctic (using the example of the Murmansk region) as particularly critical objects (hazard class I-II) is shown. The methodological basis for the use of multidisciplinary methods for multi-level observations in the monitoring system has been developed: hydraulic engineering, hydrogeology, geomechanics, geodesy, geophysics, GPS geodesy, aerial photography, remote imaging, geoinformatics, computer modeling, digital technologies. Multilevel monitoring is carried out at 4 levels related to the earth's surface: satellite, air, ground and subsurface (underground). The satellite level includes GPS surveying, processing and analysis of optical, spectral and radar images (DZZ). The air level is based on various types of digital aerial photography. The ground level is based on robotic geodetic measurements, laser and radar scanning of the surface of waste storage and relief. The underground level includes hydrogeological measurements, seismotomography and geo-radar sounding of both enclosing structures and waste alluvial deposits. Based on the obtained full-scale results, hydrogeomechanical 3D models of accumulators are created and modeling of the formation and transformation of filtration and deformation processes is carried out. This approach, in various integration of multidisciplinary methods, both at one and at different levels, allows solving monitoring problems in the hierarchy: from the accumulation of liquid industrial waste, as an object as a whole (tens of square kilometers), to individual components (kilometers and hundreds of meters) and local areas (meters and fractions of meters). Examples of the use of multidisciplinary methods and digital technologies in monitoring the storage of liquid industrial waste of mining enterprises in the western part of the Arctic (Murmansk region) are given.

**Keywords:** liquid industrial waste storage, multi-level monitoring, digital technologies, Western part of Arctic, Murmansk region

Произошедшие разрушения, а также негативные инциденты и крупные аварии накопителей жидких промышленных отходов (Айка, Венгрия; Брумадинью, Бразилия; Инд, Пакистан, и др.), приведшие

к гибели людей и огромным социально-экономическим потерям, ставят во главу угла необходимость диагностики состояния и постоянного контроля таких сооружений [1–3].

Авария на хранилище жидких промышленных отходов крупного завода Ajkaí Timfoldgyar Zrt по производству алюминия в районе города Айка (Венгрия), произошедшая 4 октября 2010 г. [2, 4], является показательным примером масштабной катастрофы. Как выяснилось уже после произошедшего, ограждающая дамба хранилища отходов была в аварийном состоянии, а само хранилище было максимально заполнено. Как следствие, ограждающая дамба разрушилась и из хранилища произошла утечка красного шлама с ядовитыми отходами. Проведенными после аварии исследованиями было установлено, что в окружающую среду попало примерно 1,1 млн м<sup>3</sup> ядовитых отходов, а площадь их разлива составила порядка 440000 м<sup>2</sup>. Погибло 7 человек, еще около 150 пострадавших получили отравления и химические ожоги. Разлив загрязненной воды разрушил 300 домов, было эвакуировано около 800 жителей г. Айка [2].

Аварии накопителей промышленных отходов действующих предприятий влекут за собой финансовые потери (неполученная прибыль вследствие остановки предприятия), дополнительные затраты (ремонтно-восстановительные работы на накопителях, дорогах, линиях электропередач, устройствах и механизмах и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление окружающих природных систем), а также штрафы за загрязнение окружающей среды и нанесенный экологический ущерб [1–3].

В западной части российского сектора Арктики (Мурманская область) расположены крупные горнопромышленные предприятия: АО «Кольская ГМК» (Печенганикель), АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», АО «ОЛКОН», АО «СЗФК». На сегодняшний день этими предприятиями добывается суммарно 60–80 млн т руды в год, которая на обоганительных фабриках перерабатывается в конечный продукт – концентрат рудного минерального сырья, а отходы переработки суммарными годовыми объемами 40–50 млн т складываются в специально созданные для этих целей накопители жидких промышленных отходов – хвостохранилища [4]. Вследствие интенсивного недропользования на протяжении практически 90 лет в Мурманской области созданы крупные хвостохранилища, в которых на сегодняшний день накоплено более 1 млрд м<sup>3</sup> жидких отходов общим весом около 2,43 млрд т.

Таким образом, хвостохранилища горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики пред-

ставляют собой огромные накопители жидких промышленных отходов, являющиеся открытыми динамическими природно-техническими системами, тесно взаимосвязанными с окружающей природной средой. В районах расположения хвостохранилищ происходит существенная деградация окружающей природной среды и изменение гидрогеологического режима, включая поверхностные водоемы и подземные воды. С учетом ежегодного прироста объемов отходов свыше 40 млн т эти преобразования продолжаются и во все большей степени обуславливают необходимость диагностики состояния и постоянного всестороннего контроля таких накопителей жидких промышленных отходов [4, 5].

Целью данного исследования является разработка методических основ комплексного применения мультидисциплинарных методов наблюдений и цифровых технологий для мониторинга накопителей жидких промышленных отходов западной части Арктики (применительно к горнопромышленным предприятиям Мурманской области).

#### **Материалы и методы исследования**

Методы исследования заключались в использовании и комплексировании мультидисциплинарных методов и цифровых технологий, как при проведении натурных наблюдений, так и при обработке, интерпретации и анализе полученных разноформатных данных [4, 6]. Методический подход к мониторингу накопителя жидких промышленных отходов заключался в применении мультидисциплинарных методов наблюдений на различных уровнях, соотношенных с земной поверхностью: спутниковом, воздушном, наземном и подземном. Спутниковый уровень включает в себя GPS геодезию, обработку и анализ оптических, спектральных и радарных снимков космических аппаратов (ДЗЗ) [7–9]. Воздушный уровень базируется на различных видах цифровой аэрофотосъемки с применением БПЛА [4, 10, 11]. Основу наземного уровня составляют визуальные наблюдения, фотофиксация, роботизированные геодезические съемки и измерения, лазерное и радарное сканирование поверхности накопителей отходов и рельефа [4, 10]. Подземный уровень включает в себя гидрологические измерения, пьезометрические и скважинные регистрации уровня подземных вод, сейсмотомографию и георадарное зондирование, как ограждающих сооружений, так и намывных отложений отходов [4, 12, 13].

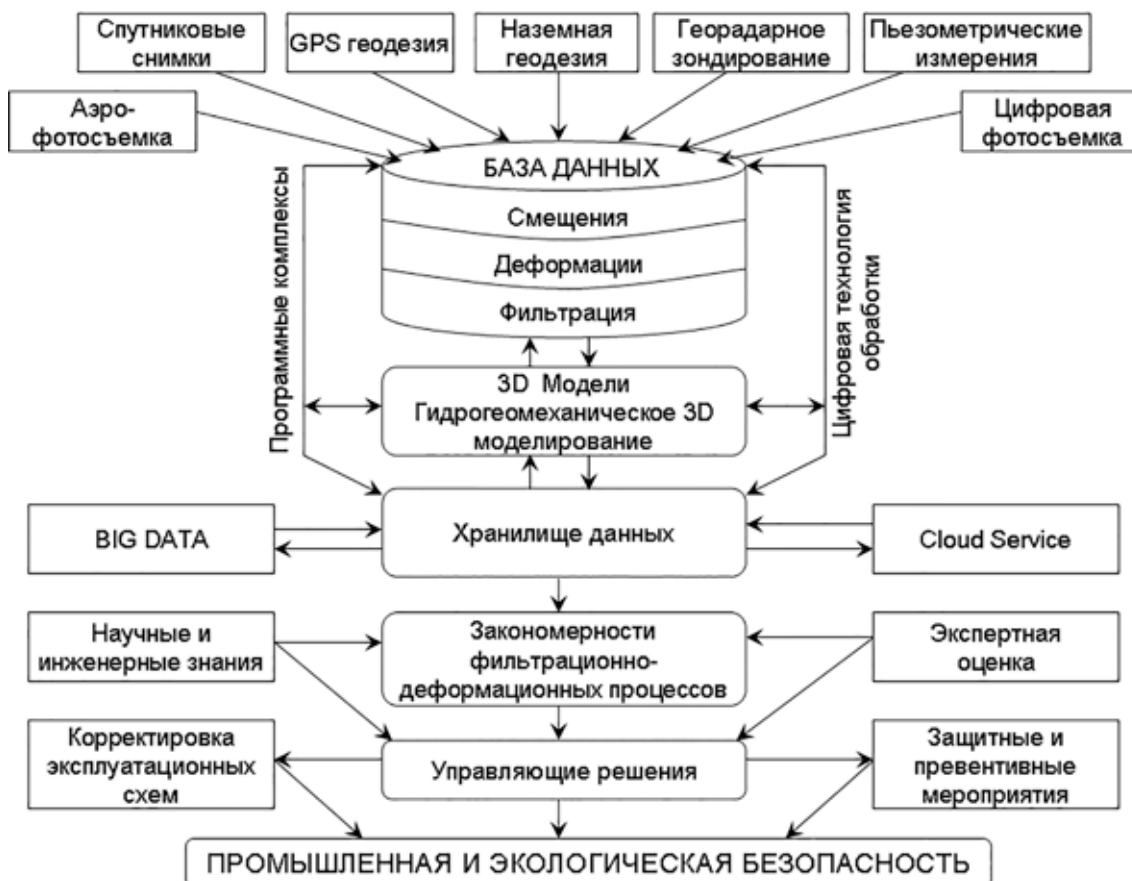


Рис. 1. Блок-схема методического подхода к комплексному применению мультидисциплинарных методов и цифровых технологий для мониторинга накопителей жидких промышленных отходов

Данные натурных наблюдений смещений, деформаций и фильтрационных процессов поступают в единую базу данных, на основании которой создаются 3D модели и выполняется сценарное и прогнозное гидрогеомеханическое моделирование (рис. 1).

Разноформатные по мультидисциплинарным методам наблюдений и компьютерному моделированию цифровые данные концентрируются в хранилище данных (с использованием сервисов BIG DATA и Cloud Service) для дальнейшего анализа и обработки. Важную роль здесь играют цифровые технологии: трансформирование данных наблюдений в цифровой формат, первичная обработка, построение 3D моделей, гидрогеомеханическое 3D моделирование с выводом численных и графических результатов в цифровом виде [14, 15]. Выявленные закономерности фильтрационно-деформационных процессов подвергаются сравнительному анализу

и сопоставлению с критериальными показателями имеющихся научно-технических и экспертных решений (нормативно-методические документы).

Такой методический подход представляет научно-техническую основу для принятия управляющих решений как для корректировки эксплуатационных схем складирования жидких промышленных отходов в накопитель, так и для разработки защитных и превентивных мероприятий.

Таким образом, комплексное применение мультидисциплинарных методов и цифровых технологий в мониторинге накопителей жидких промышленных отходов позволяет эффективно выполнять необходимую оценку текущего и прогноза перспективного состояния накопителя отходов в целях обеспечения его промышленной и экологической безопасности.

Кроме того, предложенный методический подход позволяет решать задачи мониторинга в иерархии: от накопителя

жидких промышленных отходов как объекта в целом (десятки квадратных километров) до отдельных компонентов (километры и сотни метров) и локальных участков (метры и доли метров). Комплексирование разночувствительных методов позволяет решать задачи оперативной диагностики и оценки состояния накопителя жидких промышленных отходов, своевременно выявлять и отслеживать развитие потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов.

### Результаты исследования и их обсуждение

Предложенный методический подход к комплексному применению мультидисциплинарных методов наблюдений и цифровых технологий в мониторинге накопителя жидких промышленных отходов апробирован на крупных горнопромышленных предприятиях Мурманской области (западная часть российского сектора Арктики) [4, 7, 9]. В результате была разработана системная структура комплексных исследований и мониторинга, в которой методы наблю-

дений комплексуются в три основные группы: геодезические измерения смещений и деформаций, геофизические исследования внутренней структуры и состояния грунтов, инженерно-геологические и гидрологические исследования (рис. 2) [4, 9].

В первой группе применяются наблюдения с трех уровней: наземном, воздушном и спутниковом. Во второй – наблюдения с наземного и подземного уровней. В третьей группе основной акцент смещен на подповерхностные измерения, инженерно-геологические изыскания, отбор проб как непосредственно из накопителя промышленных отходов, так и из ограждающих сооружений, лабораторные исследования физико-механических свойств и деформационно-прочностных характеристик.

В структуре комплексных исследований и мониторинга накопителей жидких промышленных отходов предусмотрено построение 3D моделей и компьютерное гидрогеомеханическое моделирование, что в совокупности с данными натурных наблюдений позволяет оценить текущее и прогнозное состояние накопителя.



Рис. 2. Структура комплексных исследований и мониторинга накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий [4]

Все полученные данные аккумулируются в автоматизированной базе данных с возможностью оперативного анализа и генерации необходимой выборки и отчета (элементы информационной системы поддержки принятия решений). Это предоставляет необходимую основу для оценки текущего и прогнозного состояния контролируемого объекта. По результатам мониторинга, в целях обеспечения надежного функционирования накопителя промышленных отходов, разрабатываются рекомендации по защитным инженерно-техническим мероприятиям.

Разработанные методические основы применения мультидисциплинарных методов и цифровых технологий реализованы в мониторинге накопителей жидких промышленных отходов крупных горнодобывающих предприятий Мурманской области (западная часть российского сектора Арктики).

Мониторинг накопителей жидких промышленных отходов горнодобывающих предприятий АО «Ковдорский ГОК» (Еврохим) и ГОК «Олений ручей» (СЗФК), на основе комплексных мультидисциплинарных методов наземных, подземных, воздушных и спутниковых наблюдений и гидрогеомеханического 3D моделирования, выполняется с 2012 г. На основе полученных мониторинговых данных установлены основные закономерности гидрогеомеханического состояния накопителей, выявлены тенденции изменения состояния вследствие эксплуатационного заполнения, созданы адаптивные 3D модели [9].

Для АО «Ковдорский ГОК» выполнена оценка фильтрационной устойчивости ограждающих накопителя сооружений, выявлены и локализованы потенциально опасные фильтрационно-деформационные процессы, определены механизмы повышенной фильтрации, формирования фильтрационных каналов [4, 7]. Был раскрыт механизм инфильтрации воды из накопителя в действующий карьер, реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы трех зон механической суффозии с повышенными фильтрационными характеристиками [12]. Выявлены зависимости устойчивости ограждающих накопитель промышленных отходов сооружений от скорости и объемов фильтрующихся вод [9].

Для ГОК «Олений ручей» (СЗФК) комплексированием междисциплинарных методов наблюдений на различных уровнях и компьютерным 3D моделированием определены условия перехода гидрогеомеханического состояния накопителя отходов, как

природно-технической системы, из стационарного состояния в нестационарные [9]. Определены индикаторы формирования потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов.

Мониторинг накопителей жидких промышленных отходов горнодобывающих предприятий АО «Кольская ГМК» (2014–2023 гг.) и КФ АО «Апатит» (2016–2024 гг.) активно развивается за счет наращивания числа и различного комплексирования натурных наблюдений спутникового, воздушного, наземного и подземного уровней. Создан ряд гидрогеомеханических 3D-моделей, которые исследуются на влияние различных природно-технических факторов на формирование фильтрационно-деформационных процессов. Выявлены особенности консолидации намывных отходов в накопителе, определяемые климатическими условиями западного сектора Арктики [9].

Для накопителя промышленных отходов АО «ОЛКОН» (2019–2022 гг.) мониторинг выполняется в основном наземными и подземными наблюдениями. По результатам выполненных исследований был решен ряд оперативных задач (оценка динамики техногенных и природных водопритоков, трассирование фильтрационных водотоков, локализация зон повышенной водонасыщенности грунтов) для обеспечения промышленной и экологической безопасности накопителя [9].

На основе результатов мониторинга накопителей горнопромышленных отходов были разработаны укрепляющие ограждающие их сооружения мероприятия и превентивные меры по обеспечению процессов складирования отходов. В частности, за время мониторинговых наблюдений накопителя АО «Ковдорский ГОК» были выявлены несколько потенциально опасных участков, которые службами предприятия были оперативно укреплены (подсыпка крупнообломочного грунта на низовой откос, подсыпка мелкодисперсным грунтом и уплотнение полков ограждающей дамбы) [9].

Опыт комплексного мониторинга накопителей жидких промышленных отходов основных горнодобывающих предприятий Мурманской области посредством интегрирования междисциплинарных методов и цифровых технологий показал его высокую эффективность. Применение цифровых технологий, как при проведении наблюдений, так и при обработке и интерпретации натурных данных, позволило повысить детальность, информативность

и достоверность получаемых разноформатных данных. Существенный вклад в формирование представлений о текущем и прогнозном состоянии накопителя жидких промышленных отходов внесло гидрогеомеханическое 3D-моделирование, позволившее оценить как механическую, так и фильтрационную устойчивость сооружения. На основе моделирования определены условия перехода накопителя промышленных отходов, как природно-технической системы, из стационарного состояния в нестационарное.

### Заключение

Разработаны методические основы комплексного применения мультидисциплинарных методов (гидротехники, гидрогеологии, геомеханики, геодезии, геофизики, GPS геодезии, аэрофотосъемки, ДЗЗ, геоинформатики) и цифровых технологий (многовариантные сценарные расчеты, цифровые модели, компьютерное гидрогеомеханическое 3D-моделирование) для мониторинга состояния накопителя жидких промышленных отходов. Предложена системная структура комплексных исследований и мониторинга, в которой методы наблюдений комплексуются в три основные группы: геодезические измерения смещений и деформаций, геофизические исследования внутренней структуры и состояния грунтов, инженерно-геологические и гидрологические исследования. В структуре мониторинга предусмотрено применение цифровых технологий (обработка разноформатных данных, многовариантные расчеты, построение цифровых моделей, компьютерное моделирование), что в совокупности с данными натурных наблюдений позволяет оценить текущее и прогнозное состояние накопителя. В итоге это позволяет, в различном комплексировании методов, решать задачи мониторинга в иерархии: от накопителя отходов как объекта в целом (десятки квадратных километров) до отдельных его компонентов (километры и сотни метров) и локальных участков (метры и доли метров).

Разработанные методические основы применения мультидисциплинарных методов и цифровых технологий реализованы в мониторинге накопителей жидких промышленных отходов крупных горнодобывающих предприятий Мурманской области (западная часть российского сектора Арктики).

### Список литературы

1. Carmo F.F.D., Kamino L.H.Y., Junior R.T. et al. Fundao tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. Vol. 15. No. 3. P. 145–151. DOI: 10.1016/J.PECON.2017.06.002.
2. Rico M., Benito G., Salgueiro A.R., D'iez-Herrero A., Pereira H.G. Reported tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 152. No. 2. P. 846–852.
3. Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, Jing Cao A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2019. P. 1–18. Article ID 4159306. DOI: 10.1155/2019/4159306.
4. 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.
5. Ковлеков И.И. Безопасность гидротехнических сооружений при эксплуатации месторождений на Севере // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 7. С. 154–164. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_7\_0\_154.
6. 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.
7. Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A. Integrated multi-level geofluid mechanics monitoring system for mine water works. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. P. 7–10. DOI: 10.17580/em.2018.02.02.
8. Рыбников П.А., Бузина Д.А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 11–1. С. 55–70. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_55.
9. 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. DOI: 10.37614/978.5.91137.465.5.
10. Напольских С.А., Крючков А.В., Андриевский А.О., Ческидов В.В. Дистанционный контроль устойчивости намывных сооружений на Стойленском ГОКЕ // *Горный журнал*. 2017. № 10. С. 52–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.11.
11. Hartwig M.E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016. Vol. 75 (2). Iss. 2. P. 605–621. DOI: 10.1007/s10064-015-0832-8.
12. Максимов Д.А., Дьяков А.Ю. Мониторинг локальных нарушений фильтрационных процессов в дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий комплексом геофизических и визуальных методов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 8. С. 154–163. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_154.
13. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Максимов Д.А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 1 (107). С. 39–49.
14. Калашник Н.А. 4D компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № S37. С. 393–400. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-393-400.
15. Зиновьева О.М., Кузнецов Д.С., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 2–1. С. 113–123. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.