

УДК 622.838:626/627(470.21)

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА



А. И. КАЛАШНИК,
зав. лабораторией, канд. техн. наук,
kalashnik@goi.kolasc.net.ru

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Введение

Произошедшие разрушения дамб/плотин на золотоносном прииске «Сибзолото» в Красноярском крае, а также негативные инциденты и крупные аварии на хвостохранилищах горнопромышленных предприятиях, таких как Vale (Брумадинью, Бразилия); Инд (Пакистан), Tashan Mining Company (Китай), Качканарский ГОК, Карамкенский ГМК, ОАО «Аммофос» (Россия), рудник Эль-Кобра (Чили), углеобогадательная фабрика (Буффало-Крик, США), шахта «Преставель» (Италия), завод «MAL Hungarian Aluminum» (Венгрия), рудник «Талвиваара» (Финляндия) и др. [1–6], приведшие к гибели людей и огромным социально-экономическим потерям, обусловили необходимость постоянного контроля и диагностики состояния этих сооружений. При этом основная проблема контроля и диагностики заключается в том, что зарождение опасных фильтрационно-деформационных процессов происходит в подповерхностных ослабленных и неоднородных зонах грунтов и хвостовых отложений, первоначально скрытых от визуальных и наземных наблюдений. Проявления таких процессов могут быть зафиксированы на ранней стадии только с применением инструментальных исследований разного масштаба и на различных уровнях, позволяющих, в том числе, контролировать все хвостохранилище в целом, а также сопряженные с ним природно-технические системы. Для этих целей требуется применение системы мониторинга, включающей в себя, с одной стороны, современные методы контроля и диагностики хвостохранилищ как открытых динамических природно-технических систем, и ориентированной, с другой стороны, на оперативное выявление на ранних стадиях геоиндикаторов потери механической прочности и фильтрационной устойчивости ограждающих дамб. Поэтому научно-технические работы, связанные с исследованием и контролем состояния хвостохранилища, направленные на минимизацию рисков техногенных аварий, являются актуальными и имеют практическое и социально-экономическое значение. С учетом этого в статье дано обоснование и приведено описание примеров применения комплексных

Приведено научно-техническое обоснование структуры комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ обогатительных фабрик на примере основных горнопромышленных предприятий Кольского региона. Выполнен анализ данных по объемам и количеству отходов переработки руд, рассмотрен опыт комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ. Предложена системная структура комплексных исследований, реализующая принципы многоуровневости (подповерхностный, поверхностный, надповерхностный и космический) и мультимасштабности (от миллиметровых зерен грунтов до километровых размеров хвостохранилища в целом как объекта).

Ключевые слова: хвостохранилища, мониторинг, многоуровневые и мультимасштабные исследования.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15

исследований и мониторинга хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона в целях обеспечения их безопасной эксплуатации.

Хвостохранилища горнопромышленных предприятий Мурманской области

В Мурманской области ключевыми отраслями промышленности являются добыча и переработка минерального рудного сырья крупными горнорудными предприятиями: АО «Кольская ГМК» (Печенганикель и Североникель), АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», АО «Олкон». В результате деятельности этих предприятий добывается суммарно 60–80 млн т руды в год, которая на обогатительных фабриках перерабатывают в конечный продукт – концентрат рудного минерального сырья, а отходы переработки суммарным годовым объемом 40–50 млн т сбрасывают фабрики в виде хвостовых отложений в специально созданные для этих целей накопители – хвостохранилища [7–9].

Вследствие интенсивного недропользования на протяжении практически 90 лет на Кольском полуострове созданы крупные хвостохранилища и шлакохранилища горнопромышленных предприятий, в которых на сегодняшний день накоплено более 1 млрд м³ отходов массой около 2,43 млрд т. По данным Горного института КНЦ РАН [7, 8], в трех хвостохранилищах КФ АО «Апатит» накоплено более 1 млрд т хвостовых отложений суммарным объемом почти 500 млн м³; АО «Кольская ГМК» – около 500 млн т (свыше 220 млн м³); АО «Олкон» – чуть менее 500 млн т (210 млн м³); АО «Ковдорский ГОК» – около 370 млн т (160 млн м³) (см. таблицу).

Хвостохранилища и шлакохранилища горнопромышленных предприятий представляют собой природно-технические системы

Данные по хвостохранилищам и шлакохранилищам основных горнопромышленных предприятий Мурманской области [7, 8]

Предприятие	Наименование отходов	Площадь, млн м ²	Высота дамбы, м	Укрупненная оценка хвостовых отложений	
				Объем, млн м ³	Количество, млн т
АНОФ-1 КФ АО «Апатит»	Хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд	1,2	0–30	59,5	136,8
АНОФ-2 КФ АО «Апатит»	Хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд	16,5	60–70	318,4	732,3
АНОФ-3 КФ АО «Апатит»	Хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд	11,5	52	77,6	178,5
Комбинат «Печенганикель» АО «Кольская ГМК»	Хвосты обогащения ОФ-1	9,0	15–45	151,4	348,2
	Хвосты обогащения ОФ-2	1,3	Н. д.	7,9	18,1
	Шлаки металлургического производства	0,9	Н. д.	30,2	69,4
Комбинат «Североникель» АО «Кольская ГМК»	Шлаки металлургического производства	0,9	Н. д.	30,9	71,1
АО «Ковдорский ГОК»	Хвосты обогащения комплексных железных руд	12,3	50–63	160	367,9
АО «Олкон»	Хвосты обогащения железных руд	10,5	30–50	211,8	487,0
ГОК «Олений Ручей» АО СЗФК	Хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд	2,8	10–20	9,5	21,8

Пр и м е ч а н и е. Н. д. – нет данных.

площадью до 10–20 млн м² и высотой ограждающих дамб до 50–70 м [6, 7]. В районах расположения хвостохранилищ и шлакохранилищ происходит существенная деградация окружающей природной среды и изменение гидрогеологического режима с перераспределением поверхностных и подземных вод. С учетом ежегодного прироста объемов отходов свыше 40 млн т [8] эти преобразования продолжаются и во все большей степени обуславливают необходимость и актуальность проблемы контроля состояния хвостохранилищ и прогнозирования тенденций изменения окружающей среды.

**Исследования Горного института
Кольского научного центра РАН**

Принимая во внимание практическую значимость и важность хвостохранилищ в технологической цепочке функционирования горнопромышленных предприятий, в Горном институте КНЦ РАН были выполнены фундаментальные и прикладные исследования, нацеленные на обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений. Для этих целей в структуре института в 2008 г. была создана лаборатория геофлюидомеханики, основными научными направлениями которой явились: разработка геогидромеханических моделей и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния водонасыщенных горных пород; исследование взаимосвязи геомеханических и гидродинамических процессов для минимизации рисков их опасных проявлений в природно-технических системах; развитие научных основ комплексных исследований и мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий.

В новой лаборатории при финансовой поддержке Отделения наук о Земле РАН и грантов РФФИ была создана необходимая для проведения исследований материально-техническая база, включающая современное оборудование, приборы, пакеты лицензионных программ для обработки данных и компьютерного 3D-моделирования в упругой и упругопластической постановке, в том числе:

- беспилотный летательный аппарат (БПЛА) Geoscan 101 для аэрофотосъемки;

- георадарный комплекс Ramac GPR/ХЗМ (Швеция) с экранированными антеннами (100, 500, 800 МГц) для зондирования горно-геологических сред на глубину до 30 м в условиях механических помех;

- георадарные комплексы «Лоза-1Н» и «Лоза-1В» с неэкранированными антеннами (10, 50, 100, 200, 300 МГц) для зондирования горно-геологических сред на глубину до 200 м;

- сейсморазведочная система «ЭЛЛИСС-3»;
- комплекс оборудования для геодезии, включая спутниковое (Topcon Hiper+, Повер) Topcon Hiper+, Topcon GRS, Topcon QS3M, Sokkia B 30-35);

- оборудование для проведения инженерно-изыскательских работ;

- программные комплексы для обработки данных и моделирования поведения флюидонасыщенных сред: PLAXIS 3D, Radexplorer V.1.4, «КРОТ», «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ», Topcon Tools, Agisoft Photoscan Pro, «ГИС Спутник».

Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ выполняются на регулярной основе для всех основных горнопромышленных предприятий Мурманской области: АО «Ковдорский ГОК» (с 2012 г.), АО «Кольская ГМК» (с 2014 г.), КФ АО «Апатит» (с 2010 г.), ГОК «Олений Ручей» СЗФК (с 2010 г.), АО «Олкон» (с 2015 г.) [5, 6]. Наряду с традиционными методами исследований и контроля сформирован комплексный подход к оценке безопасности гидротехнических сооружений, основанный на совместном использовании (рис. 1) георадарного зондирования, GPS-съемки, анализе спутниковых оптических и радарных снимков, компьютерном 4D-моделировании (с учетом фактора времени), комплексирование которых позволяет реализовать принципы мультимасштабности (от миллиметров – размеры зерен хвостовых отложений, до километров и десятков километров – все хвостохранилище в целом) и многоуровневости (данные по отношению к земной поверхности: подповерхностные, поверхностные, надповерхностные (воздушные и космические)) [5, 10].

Применение георадарного зондирования позволило получать более детальную и непрерывную картину внутреннего строения дамб и динамики формирования депрессионной плоскости

грунтовых вод, а в комплексировании с микросейсмопрофилированием – уточнять изменчивость механических свойств и водонасыщенности грунтов.

С 2014 г. в исследованиях начали использовать программный комплекс PLAXIS 3D, применение которого позволило перейти к формированию детальных гидрогеомеханических 3D-моделей гидротехнических сооружений (ГТС) хвостохранилищ и моделированию фильтрационно-деформационных процессов. С 2019 г. в PLAXIS 3D начали решать задачи консолидации грунтов и совместных фильтрационно-деформационных процессов с учетом фактора времени. Практическая реализация этих задач позволила создать гидрогеомеханические модели хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», ГОКа «Олений Ручей» СЗФК, АО «Кольская ГМК».

В 2016 г. к задачам комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ были привлечены данные спутниковых оптических и радарных снимков, что позволило получать цельную картину всего контролируемого объекта. В научной кооперации с Балтийским федеральным университетом им. И. Канта и Архангельским научным центром УрО РАН была выполнена математическая обработка ряда радарных снимков спутника Sentinel Европейского космического агентства, результаты которой были интерпретированы для хвостохранилищ АО «Кольская ГМК» и АО «Ковдорский ГОК». Для координатной привязки площадных снимков использовали GPS-определения и геодезическую тахеометрическую съемку координат контрольных пунктов.

В 2018 г. к задачам площадного мониторинга хвостохранилищ была подключена аэрофотосъемка с применением БПЛА Geoscan 101 с возможностью горизонтальной и вертикальной детализации, а также построением цифровых 3D-моделей рельефа и объектов наблюдения.

В ближайших планах лаборатории предусмотрено проведение исследований с использованием новейших скважинных георадаров компании MALA (Швеция) внутренней структуры ограждающих дамб и подстилающего чашу хвостохранилища геологического основания.

Результаты комплексных исследований и мониторинга

Горный институт КНЦ РАН проводит системные мониторинговые исследования на ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» с 2012 г. по настоящее время. Особенностью хвостохранилища является то, что оно было разделено дамбой № 1 на два поля (поле № 1 и поле № 2). Поле № 2 хвостохранилища заполнялось отходами переработки руды с обогатительной фабрики в штатном режиме, а хвостовые отложения поля № 1, заполненного в предыдущие годы, были вовлечены в повторную переработку с их экскаваторной выемкой. Вследствие этого дамба № 1 хвостохранилища, с одной стороны, является ограждающей для поля



Рис. 1. Структура комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ горнопромышленных предприятий

№ 2, с другой – фактически бортом уже не работающего карьера, который образовался в поле № 1 [7].

Для выполнения мониторинга фильтрационно-деформационных процессов в дамбе № 1 хвостохранилища в целях оперативного выявления рисков потери ее устойчивости был создан наблюдательный полигон, включающий сеть гидрогеологических скважин и пьезометров, контрольно-наблюдательных реперов, марок и профилей для георадарного и сейсмического профилирования. Мониторинговые наблюдения выполняются ежемесячно (за исключением декабря–января – периода полярной ночи в условиях Арктики) комплексированием визуальных наблюдений, фотофиксации, георадарного зондирования и гидрогеологических измерений. В летние месяцы (в условиях полярного дня) к перечисленным наблюдениям добавляются геодезические наземные и GPS-измерения по контрольно-наблюдательным реперам, аэрофотосъемка и данные спутниковых оптических и радарных снимков. Прогноз изменения гидрогеомеханического состояния хвостохранилища с учетом паводковых и внепроектных нагрузок выполняется на основе результатов многовариантного компьютерного моделирования в PLAXIS 3D [11].

Комплексирование применяемых методов и ежемесячная регулярность позволяют осуществлять постоянный контроль состояния дамбы № 1 и оперативно выявить формирование опасных фильтрационно-деформационных процессов. За время наблюдения этими методами были выявлены несколько опасных участков, которые были оперативно укреплены (путем подсыпки крупнообломочного грунта на низовой откос, подсыпки мелкодисперсным грунтом и уплотнения полка) [6]. В целом, по данным комплексных наблюдений мониторинга, хвостохранилище эксплуатируется удовлетворительно, а ограждающая дамба № 1 сохраняет свою механическую и фильтрационную устойчивость.

На ГТС АО «Кольская ГМК» мониторинговые наблюдения проводятся с 2014 г. Хвостохранилище обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» овражного типа, по способу заполнения – намывное, предназначено для непрерывного складирования хвостов обогащения медно-никелевых руд и обеспечения фабрики чистой оборотной водой по замкнутому циклу оборотного водоснабжения. Ограждающие дамбы хвостохранилища (Северная и Южная) протяженностью около 4 км каждая относятся к I классу капитальности. На ГТС хвостохранилища ежегодно проводятся мониторинговые наблюдения, включающие в себя высокоточные режимные геодезические измерения по контрольным реперам; исполнительную съемку откосов по створам дамб; топографическую съемку текущей ситуации дамб; техническое нивелирование гребней дамб обвалования и намывных дамб; измерения длин намывных пляжей и уровня воды; промер глубин отстойного пляжа с измерением толщины донных отложений.

На ГОК «Олений Ручей» СЗФК с применением георадарных комплексов проведено подповерхностное зондирование площадки под строительство хвостохранилища, а также выполнена оценка качества уплотнения грунтов при поэтапной отсыпке ограждающих дамб. В целях контроля состояния и эффективности работы ГТС хвостохранилища был создан наблюдательный полигон, включающий линии универсальных контрольно-наблюдательных реперов (для классической наземной и GPS-геодезии) на всех ограждающих дамбах, сеть гидрогеологических скважин и пьезометров, линии постоянных георадарных и сейсмических профилей. Мониторинговые наблюдения выполняют на регулярной основе – один раз в месяц.

Кроме того, институтом был решен ряд задач для АО «Апатит» и АО «Олкон». На ГТС (плотинах) отстойников Восточного рудника АО «Апатит» были выполнены режимные мониторинговые геофизические исследования, в результате которых была получена детальная информация об их структуре и состоянии. В процессе сравнительного анализа были выделены проблемные участки в теле ГТС, за развитием которых впоследствии вели инструментальное наблюдение с более высокой периодичностью. Для повышения качества инструментального мониторинга деформационных процессов в теле ГТС были заложены контрольные реперы/марки и организован геодезический полигон.

Особенностью мониторинговых работ на хвостохранилище ГОК АО «Олкон» было определение притока и оттока воды в бассейне ГТС, составление водного баланса хвостохранилища и выявление его значимости. Для этих целей в зимний период были выполнены два цикла измерения глубины водоема при помощи георадарного зондирования с поверхности льда. В прудке-отстойнике хвостохранилища было выполнено профилирование по сетке с шагом 150×150 м с жесткой привязкой в узловых точках путем измерения глубины воды. Была выполнена топографическая съемка по периметру ледового покрова, а по результатам обработки георадарных данных произведен расчет объемов воды в хвостохранилище. В летний период с водной поверхности проведены замеры глубины прудка-отстойника хвостохранилища, осуществлена съемка пляжного контура воды, а на участке дамбы с повышенной фильтрацией выполнен

эксперимент с применением флюоресцирующего раствора в целях определения скорости и объемов фильтрующейся воды.

Основными параметрами, влияющими на безопасную эксплуатацию хвостохранилища (как накопителя жидких отходов производства обогатительных фабрик) и ограждающих его дамб, являются: литологический тип, гранулярный состав и физико-механические свойства намывных отложений и насыпных грунтов и пород; способ возведения (наращивания) и конструкция ограждающих дамб, технология и очередность намыва; степень консолидации хвостовых отложений и насыпных грунтов; фильтрационный режим; механическая прочность и фильтрационная устойчивость намывных и насыпных дамб.

В процессе заполнения хвостохранилища с использованием существующей технологии сброса хвостовых отложений (намыва) могут возникать следующие проблемы [1, 6, 12, 13]:

- уполаживание намывных пляжей, что приводит к увеличению их ширины и уменьшению превышения гребня намытых хвостов уровня воды в прудке-отстойнике;
- уменьшение глубины и объема воды в прудке-отстойнике, что приводит к увеличению времени, необходимого для осветления оборотной воды в соответствии с технологическими требованиями, а также к техническим сложностям в системе замкнутого водооборота.

Поэтому выполняемые комплексные исследования были направлены на обеспечение решения перечисленных выше проблем, в том числе на повышение эффективности намыва и безопасного состояния как намывной дамбы, так и насыпной ограждающей дамбы, последующее наращивание которой осуществлялся посредством отсыпки на гребень намывной.

Инженерно-геологические изыскания включали в себя отбор проб хвостовых отложений по наблюдательным створам на удалении 5, 50 и 150 м от кромки намывного пляжа, первичное их взвешивание и помещение в герметичные контейнеры. Затем в лабораторных условиях определяли их физико-механические свойства, необходимые для оценки качества намыва и создания гидрогеомеханической модели.

Уменьшение/увеличение крупности частиц в результате помола руды мельницами обогатительной фабрики приводит к замедлению/ускорению консолидации и к соответствующему изменению прочностных свойств отложений. Поэтому при проведении комплексных исследований и мониторинга осуществляли контроль качества укладки в упорную призму ограждающей дамбы крупности хвостовых отложений. Было выявлено, что формирование депрессионной поверхности на намывном участке происходит быстрее вследствие более высоких коэффициентов фильтрации в крупнозернистых хвостах. В свою очередь, уменьшение фильтрации из прудка-отстойника хвостохранилища обусловливается складированием в пруд мелкодисперсных глинистых частиц с низкими коэффициентами фильтрации.

Примеры формирования депрессионной кривой, по данным комплексных георадарных и гидрогеологических исследований, при соблюдении условий намыва хвостовых отложений и фильтрации, и при образовании подпора вследствие отклонения в крупности намываемых отложений, приведены на **рис. 2**.

С применением геодезических измерений и съемок, а также с привлечением аэрофотосъемки и спутниковых снимков, осуществлялся контроль обеспечения ширины намывного пляжа 150–250 м. При этом превышение гребня намывной дамбы над уровнем воды в прудке хвостохранилища должно было быть не менее 1,5 м. Это в совокупности обеспечивало увеличение глубины и объема прудка-отстойника хвостохранилища и тем самым создавало необходимые условия осветления воды, задействованной в схеме замкнутого водооборота.

Вместе с тем технологически выполняемый поочередный намыв на разных участках, с одной стороны, позволяет обеспечить равномерность формирования намывного пляжа, а с другой – обуславливает временное неравномерное распределение гидравлического уклона по длинным осям ограждающих дамб (рис. 3). Неравномерное распределение обуславливало необходимость повышенного внимания, и поэтому на таких участках мониторинговые георадарные наблюдения проводили не реже 1 раза в месяц.

Поэтому, по мнению автора, основная идея комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона заключается в интегрировании нормируемых ГОСТами и инструкциями наблюдений и современных междисциплинарных методов. Такое комплексирование методов и подходов позволяло уже на ранней стадии выявить развитие опасных фильтрационно-деформационных процессов и обеспечить своевременность принятия решения по предотвращению развития чрезвычайной и аварийной ситуации.

В развитие методологических подходов, изложенных в работах [2, 5, 6, 10, 13, 14], наряду с традиционными визуальными, гидрогеологическими, инженерно-геологическими и инженерно-геодезическими методами использовались подповерхностное георадарное зондирование и сейсмическое профилирование, достаточно хорошо зарекомендовавшие себя при мониторинге горнотехнических систем [6, 10]. Смещения контрольно-наблюдательных пунктов достаточно уверенно и с высокой точностью определялись классической геодезией (нивелирование и полигонометрия). Вместе с тем периодичность проводимых измерений (1–2 раза в год) и удаленность друг от друга наблюдаемых пунктов (контрольных реперов) не отвечают требованиям оперативности и непрерывности. Поэтому использование аэрофотосъемки с БПЛА, спутниковых оптических и радарных снимков, а также GPS-измерений и технологий, существенно повышали информативность и детальность наблюдений и контроля [10, 12–16].

Создание гидрогеомеханических 3D-моделей и компьютерное прогнозное (с учетом фактора времени) моделирование в комплексировании с данными натурных измерений и контроля позволили вывести задачи обеспечения промышленной безопасности хвостохранилищ на новый уровень.

Заключение

Выполнен анализ данных по объемам и количеству отходов горного производства в хвостохранилищах основных горнопромышленных предприятий Кольского полуострова. Дана

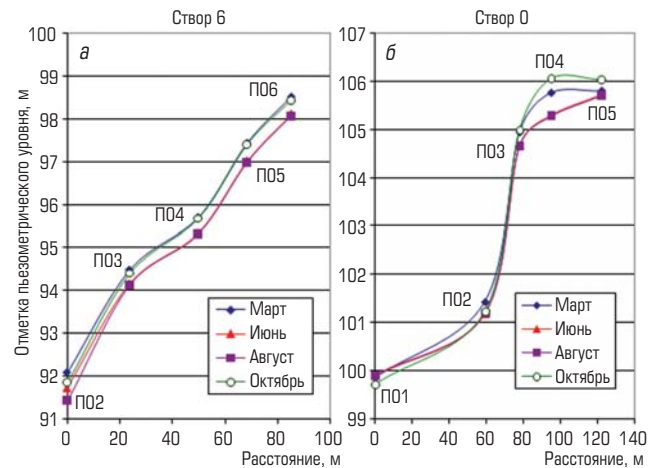


Рис. 2. Формирование депрессионной кривой по створам наблюдений:

а – технологически регламентируемая; *б* – с образованием подпора

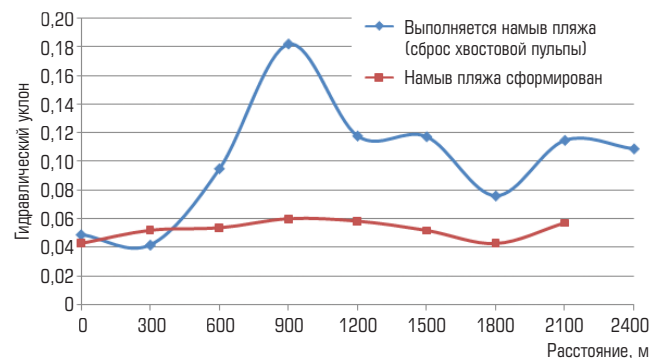


Рис. 3. Неравномерность распределения гидравлического уклона по участкам ограждающих дамб

характеристика созданной в Горном институте КНЦ РАН лаборатории, основным научным направлением которой является проведение комплексных исследований и мониторинг гидротехнических сооружений хвостохранилищ с применением современных междисциплинарных методов. Описана материально-техническая база, приборы, оборудование и информационные ресурсы, используемые лабораторией при проведении полевых и камеральных работ. Рассмотрен опыт и результаты комплексных исследований и мониторинга хвостохранилищ крупных горнопромышленных предприятий Кольского региона. Выявлены общие особенности, обусловленные интенсивным заполнением чаш накопителей отходов. Предложена системная структура комплексных исследований междисциплинарными методами, реализующая принципы многоуровневости (подповерхностный, поверхностный, надповерхностный и космический) и мультимасштабности (от миллиметровых зерен грунтов до километровых размеров хвостохранилища в целом как объекта). Разработанные принципы комплексных исследований и мониторинга ГТС хвостохранилищ апробированы на всех крупных горнопромышленных предприятиях Кольского региона.

Библиографический список

- Ritcey G. M. Tailings management. – Amsterdam : Elsevier, 1989. – 970 p.
- 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.
- Morin R. Satellite Remote Sensing for Effective Monitoring of Tailings Storage // *Engineering and Mining Journal*. 2016. December.
- Ранкс К. Сточные воды «Талвиваары» остановлены // *Фонтанка.ру*. 2012. URL: <http://fontanka.fi/articles/7736/> (дата обращения: 12.05.2020).
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Integrated multi-level geofluid mechanics monitoring system for mine waterworks // *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. P. 7–10. DOI: 10.17580/em.2018.02.02
- Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // *Вестник МГТУ*. 2017. Т. 20. № 1/1. С. 13–20.
- Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения: разработка и формирование. – Апатиты : КНЦ РАН, 2017. – 175 с.
- Мельников Н. Н., Бусырев В. М., Чуркин О. Е. Оценка стоимости запасов и эффективности использования техногенных месторождений // *ГИАБ*. 2018. № 8. С. 200–207.
- Чуркин О. Е., Гулярова А. А. Освоение отходов горного производства как инвестиционное направление развития горнорудной промышленности Кольского полуострова // *Экономика, предпринимательство и право*. 2020. Т. 10. № 3. С. 905–916.
- 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. 1–8.
- Калашник Н. А. 4D-компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища // *ГИАБ*. 2019. № 537. С. 393–400.
- 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
- Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Логинов А. В., Олейникова Е. А. Мониторинг состояния дамбы хвостохранилища намывного типа // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017. Т. 1. № 1. С. 125–129.
- Мосейкин В. В., Гальперин А. М., Ческидов В. В., Пуневский С. А. Совершенствование удаленного автоматизированного контроля откосных сооружений на горных предприятиях // *Горный журнал*. 2017. № 12. С. 82–86. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.16
- 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.
- Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубев В. И. и др. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов // *Наука и технологические разработки*. 2016. Т. 95. № 3. С. 5–11. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp.101–106
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.15

Integrated research and monitoring of mine tailings on the Kola Peninsula

Information about author

A. I. Kalashnik¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, kalashnik@goi.kolasc.net.ru

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The article presents the scientific and technical justification for the structure of integrated research and monitoring of tailings in terms of the major mines of the Kola Region. The data on the volume and quantity of mining waste in the tailings, as well as the parameters of the protective dams have been analyzed.

The author has revealed the features of the volume ratio of ore production and mill tailings over a period from 2008 to 2020. The article presents some information about a laboratory founded at the Mining Institute of the Kola Science Center, intended to perform comprehensive studies and monitoring of the hydraulic facilities of tailings storages using modern interdisciplinary methods. The material and technical facilities, instruments, equipment and information resources used by the laboratory during the field and lab-scale operations are described. The author reviews the experience and results of comprehensive research and monitoring of large mine tailings in the Kola Region. The general features of the intensive accumulation of mine tailings have been revealed.

A system-based structure of comprehensive research has been proposed, which implements the principles of multilevel (subsurface, surface, superterranean and space) and multiscale (from millimeter grains of soil to kilometer-sized tailings as a whole as an object) investigation. The implementation of the developed principles at the specific observation and monitoring objects has been substantiated. The author has justified integration of the methods, necessary equipment and regime of observation and monitoring activities. The developed principles of comprehensive research and monitoring of hydraulic facilities of tailings storages have been tested at all large mines of the Kola Region.

Keywords: tailings, monitoring, multi-level and multi-scale research.

References

- Ritcey G. M. Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry. Amsterdam : Elsevier, 1989. 970 c.
- Clarkson L., Williams D. Critical review of tailings dam monitoring best practice. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020. Vol. 34, Iss. 2. pp. 119–148.

- Morin R. Satellite Remote Sensing for Effective Monitoring of Tailings Storage. *Engineering and Mining Journal*. 2016. December.
- Ranks K. Talvivaara waste water disposal being stopped. *Fontanka.ru* 2012. URL: <https://www.fontanka.ru/2012/11/11/fia07736/> (accessed: 12.05.2020).
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Integrated multi-level geofluid mechanics monitoring system for mine waterworks. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 7–10. DOI: 10.17580/em.2018.02.02
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. The use of modern methods for complex studies of the hydrotechnical structures of the Barents sea region. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 20, No. 1-1. pp. 13–20.
- Arkhipov A. V., Reshetnyak S. P. Manmade deposits : formation and management. Apatity : KNTS RAN, 2017. 175 p.
- Melnikov N. N., Busyrev V. M., Churkin O. E. Mining waste: appraisal and use efficiency. *GIAB*. 2018. No. 8. pp. 200–207.
- Churkin O. E., Gilyarova A. A. Mining wastes management as an investment direction for the development of the Kola Peninsula mining industry. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo*. 2020. Vol. 10, No. 3. pp. 905–916.
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Integrated multi-level geomonitoring of natural-and-technical objects in the mining industry. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, Iss 4. pp. 535–540.
- Kalashnik N. A. 4D computer modelling of filtration-deformation processes in a protective tailing dam. *GIAB*. 2019. Special issue 37. Digital technologies in mining. pp. 393–400.
- Napolskikh S. A., Kryuchkov A. V., Andrievsky A. O., Cheskidov V. V. Remote stability control of hydraulic inwash structures at Stoilensky Mining and Processing Plant. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 10. pp. 52–55. DOI: 10.17580/gzh.2017.10.11
- Besimbaeva O. G., Khmyrova E. N., Loginov A. V., Oleynikova E. A. Research of the opportunities of 3D modeling for mine surveying support of mining works. *Interexpo Geo-Sibir*. 2017. Vol. 1, No. 1. pp. 125–129.
- Moseykin V. V., Galperin A. M., Cheskidov V. V., Punevsky S. A. Enhancement of automated remote slope monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 12. pp. 82–86. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.16
- 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, Iss. 2. pp. 605–621.
- Mikhaylov V. O., Kiseleva E. A., Smolyaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I. et al. InSAR: new technologies of the satellite monitoring of mineral resources exploration fields and natural and man-made object displacements. *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki*. 2016. Vol. 95, No. 3. pp. 5–11.