

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Куренков Дмитрий Сергеевич

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ХРАНИЛИЩ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЕЗВОЖЕННЫХ ОТХОДОВ
ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент Ческидов Василий Владимирович

Москва, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Рост численности населения Земли и интенсификация его хозяйственной деятельности сопровождается увеличением количества образующихся отходов. В настоящее время их годовые объемы неуклонно растут и превысили отметку 100 млрд т при долевом участии РФ около 8,5 млрд т, при этом на обогатительные производственные процессы приходится до 1 млрд т хвостов – отходов обогащения твердых полезных ископаемых. Дальнейший рост объемов добычи минеральных ресурсов на фоне возросших экологических требований к недропользованию вызывает необходимость разработки рациональных способов размещения отходов обогатительных производств в специальные горнотехнические сооружения, в частности, полностью или частично водонасыщенные, так как аварии на них сопровождаются обычно серьезными негативными экологическими и экономическими последствиями. Данные обстоятельства предъявляют к объектам размещения отходов требование обеспечения безопасности их строительства и эксплуатации.

Преимущественно при размещении отходов обогатительных производств используются традиционные технологии гидроотвалообразования, когда хвосты размещаются в сформированные емкости намывного сооружения в виде пульпы – смеси минеральных частиц с водой. Это приводит к формированию во внутренних зонах мощной толщи водонасыщенных тонкодисперсных неуплотненных пород, специфической особенностью которых является наличие избыточного порового давления, существенно снижающего их прочностные свойства и сказывающееся на устойчивости откосов. В последние годы на обогатительных фабриках различных производств используются технологии предварительного обезвоживания хвостов с получением продукта влажностью 12–18 % и последующим формированием объектов размещения, так называемым, сухим способом, с применением автомобильной и бульдозерной техники. Целью складирования сгущенных и глубоко обезвоженных хвостов является снижение влажности техногенных отложений, что повышает вместимость хранилища, устойчивость откосов и снижает риск наступления аварийной ситуации в результате тиксотропного разжижения.

Современное горное производство требует решения новых задач, направленных на создание принципов формирования хранилищ отходов переработки рудного сырья в условиях мирового тренда к отказу от складирования водонасыщенных отложений, ограниченности территориальных ресурсов и отсутствия широкого опыта возведения таких массивов. Поэтому разработка инженерно-геологического обеспечения формирования и эксплуатации хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения рудных полезных ископаемых и контроля их состояния является актуальной научной, технологической и производственной задачей особенно для объектов черной металлургии.

Целью диссертационной работы является разработка инженерно-геологического обеспечения формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Идея работы заключается в создании рациональных технологий подготовки к складированию и формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные **задачи**:

- проведен анализ российского и зарубежного опыта формирования хранилищ водонасыщенных отходов обогащения твердых полезных ископаемых и систем контроля их состояния;
- выявлены основные факторы, влияющие на безопасные условия формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов;
- обоснованы показатели состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов;
- разработаны рациональные технологии обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов и их последующего складирования в хранилища;
- определена необходимая и достаточная частота измерений параметров хранилищ, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, позволяющая обеспечить экологическую безопасность их эксплуатации;
- обоснованы параметры системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Учет характеристик и особенностей рельефа местности, физико-механических свойств и возможности тиксотропных превращений обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов позволяет уменьшить объемы возводимых ограждающих дамб в 1,50÷4,25 раза и сократить площади нарушаемых территорий.

2. Предварительное обезвоживание отходов обогащения железистых кварцитов до остаточной весовой влажности 10 % с использованием вибрационных установок и дальнейшее складирование отходов с применением технологии послойной укладки или укладки «по склону» обеспечивает рациональное использование земельных ресурсов, экологическую безопасность и стабильное функционирование хвостового хозяйства.

3. Разработанная классификация горно-геологических явлений в откосных горнотехнических сооружениях, сложенных отходами переработки железорудного сырья, позволяет создать систему мониторинга и управления состоянием хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Методы исследований включают:

- анализ научно-технической информации по теме исследования, обобщение мирового и отечественного опыта формирования хранилищ отходов горного производства и контроля их состояния;
- лабораторные исследования физико-механических свойств отложений техногенных массивов и хвостовых пульп, включая такие методы, как спектроскопический, гравиметрический и инфракрасно-абсорбционный методы определения содержания элементов, рентгенофазовый анализ и мёссбауэровская спектроскопия, пикнометрический метод определения истинной плотности частиц;
- статистические методы обработки и интерпретации инженерно-геологической информации с учетом изменчивости свойств отходов обогащения железистых кварцитов;
- расчеты устойчивости откосных сооружений, сложенных отходами обогащения железистых кварцитов;
- компьютерное моделирование параметров элементов горнопромышленных природно-техногенных систем.

Научная новизна исследований:

1. Установлены зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости массива, сформированного глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, от показателей их свойств, в том числе степени водонасыщенности, и геометрических параметров хранилища.

2. Обоснованы технологические схемы формирования хранилищ предварительно обезвоженных с использованием вибрационной установки отходов обогащения железистых кварцитов с применением послойной укладки или укладки «по склону».

3. Разработана классификация горно-геологических явлений в откосных сооружениях, сложенных отходами обогащения железистых кварцитов.

4. Создана и обоснована четырехуровневая типизация характеристик горнотехнических объектов, которая позволяет разработать системы мониторинга хранилищ, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, для обеспечения экологической безопасности их эксплуатации.

Практическое значение исследований состоит в следующем:

1. Определены оптимальные формы рельефа при формировании хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов с учетом их различной влажности для условий АО «Карельский окатыш».

2. На 10 % увеличена вместимость хранилища отходов обогащения железистых кварцитов благодаря послойной укладке или укладке «по склону» хвостов со средней весовой влажностью 10 % после их предварительного глубокого обезвоживания в вибрационной установке.

3. Разработана структура и состав системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, обеспечивающие рациональную частоту получения инженерно-геологической и гидрогеологической информации.

Апробация работы. Содержание диссертационного исследования, полученные результаты и основные научные положения докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах, форумах и семинарах:

13-я Международная научная школа молодых ученых «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 21–25 ноября 2016 года); Юбилейный XXV Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2017» (Москва, 23–27 января 2017 года); XV Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 29–31 марта 2017 года); The XIIIth, XIVth, XVth, XVIIth International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Saint-Petersburg, April 19–21, 2017; April 18–20, 2018; May 13–17, 2019; May 31–June 06, 2021); 68. ВНТ–Freiberger Universitätsforum: Freiberg-St. Petersburger-Colloquium for Young Scientists (Germany, Freiberg, June 8–9, 2017); 70th Berg-und Hüttenmännischer Tag 2019 (Germany, Freiberg, June 5–7, 2019); XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2021» (Москва, 25–29 января 2021 года).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, выборе методов проведения исследований, формулировании основных научных положений, проведении анализа научно-технической литературы, лабораторных исследований, выполнении расчетных работ, анализе и обобщении полученных результатов, модернизации конструкции вибрационной машины для предварительной стадии обработки хвостовых пульп и установлении оптимальных режимов ее работы, разработке и обосновании схем формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, разработке классификации горно-геологических явлений в откосных сооружениях, сложенных отходами переработки железорудного сырья, разработке системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждаются:

- использованием комплекса общепризнанных научных методов исследования свойств отходов обогащения;
- удовлетворительной сходимостью полученных результатов с результатами других исследователей;
- применением методик проведения исследований с использованием сертифицированного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

Публикации. По теме исследования опубликовано 8 научных работ, в том числе 2 в изданиях рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 2 – в изданиях индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ технологий складирования отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых, рассмотрены причины деформаций откосных горнотехнических сооружений и аварийных ситуаций на отвалах и хвостохранилищах. Также приведен обзор существующих технологий сгущения, глубокого обезвоживания и транспортирования хвостов обогатительных предприятий в хранилища, проанализированы современные методы и средства контроля состояния техногенных массивов горно-обогатительных производств.

Вопросам обеспечения экологической безопасности при возведении техногенных массивов, технологиям формирования хранилищ отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых, управлению состоянием массивов и обеспечению устойчивости откосов, инженерно-геологическому изучению техногенных массивов, оценке экологического риска при изменении состояния природно-техногенных систем, разработке методических основ мониторинга безопасности откосных горнотехнических сооружений посвящены работы Г.К. Бондарика, А.Д. Васильевой, А.М. Гальперина, В.Д. Горлова, Р.Э. Дашко, В.А. Еременко, Ю.К. Зарецкого, В.Г. Зотеева, Ю.А. Израэля, Н.А. Калашника, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянца, В.С. Круподерова, О.Ю. Крячко, Н.А. Кутеповой, Ю.И. Кутепова, А.Г. Лутовинова, Н.Н. Маслова, В.А. Мироненко, В.В. Мосейкина, П.Н. Панюкова, М.Е. Певзнера, В.В. Ржевского, Е.В. Сергиной, К.Н. Трубецкого, В.С. Федотенко, В. Фёрстера, Г.Л. Фисенко, В.В. Ческидова, А.Д. Шерстюкова, Х.Ю. Шефа, М.В. Щёкиной, И.М. Ялганца, Л.А. Ярг и других, а также работы зарубежных авторов F.G. Bell, A.W. Bishop, D.W. Carvalho, M.P. Davies, W. Fellenius, D.G. Fredlund, K.A. Hudson-Edwards, N.R. Morgenstern, E.E. Spencer, H. Klapperich, D. Kossoff, R. Pastorok, E. Robinsky, S.K. Sarma, D. Shields, N. Tamaskovics, H. Tscheschlok, S.G. Vick.

Образующиеся в процессе обогащения твердых полезных ископаемых отходы преимущественно размещаются в хвостохранилища намывного типа, наиболее часто подверженных разрушениям и поэтому представляющих повышенную опасность, особенно при складировании отходов переработки железорудного сырья. Сегодня в мире наблюдается тенденция, что для эффективного и безопасного формирования и эксплуатации хранилищ отходов обогащения руд необходимо внедрять в данную сферу деятельности наилучшие доступные технологии (НДТ). Одним из основных принципов НДТ является складирование в хранилища хвостов с низкой остаточной влажностью, предполагающее их предварительное глубокое обезвоживание. В Российской Федерации хранилища такого типа представлены в

единичных случаях, соответственно отсутствует широкий опыт их сооружения и эксплуатации. По этой причине разработка и обоснование инженерно-геологического обеспечения возведения и функционирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов переработки железорудного сырья является основной задачей данного исследования.

Вторая глава посвящена анализу основных факторов, влияющих на устойчивость откосов и вместимость хранилищ отходов переработки железорудного сырья. Анализ проводился для условий горно-обогатительного комбината АО «Карельский окатыш», расположенного в г. Костомукше, республика Карелия.

На первом этапе были изучены свойства и характеристики отходов обогащения железистых кварцитов – хвосты мокрой магнитной сепарации (ММС). Ситовым анализом был определен гранулометрический состав. Было получено, что большую часть хвостов (94,5 %) составляют песчаные частицы. Исследованные хвосты можно отнести к мелкозернистым пескам. Средневзвешенный диаметр частиц составил 0,266 мм.

Определение химического состава производилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии и гравиметрическим способом. В составе хвостов преобладает оксид кремния SiO_2 (71,14 %). Остальные элементы преимущественно представлены оксидами двух- и трехвалентного железа, кальция, магния, алюминия, щелочных металлов, фосфора и серы.

Анализ минеральных составляющих методами рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии показал, что основными составляющими хвостов являются кварц, магнетит, гематит, силикаты и алюмосиликаты, амфиболы, слюды, полевые шпаты, пироксены и карбонаты. Другие исследования свойств включали определение плотности минеральных частиц $\rho_{\text{хв. уст}}$ и плотности хвостов в сухом состоянии $\rho_{\text{хв. сух}}$. Методом гелиевой пикнометрии были получены значения $\rho_{\text{хв. уст}} = 2750 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{хв. сух}} = 1450 \text{ кг/м}^3$. Полученные результаты исследования состава и свойств отходов обогащения железистых кварцитов показали, что хвосты не склонны к тиксотропному разжижению при механическом воздействии.

Деформационные свойства хвостов ММС оценивались компрессионными испытаниями в одометре без возможности бокового расширения образца. Исследования включали ступенчатое нагружение образца хвостов в диапазоне $P = 0,05\text{--}0,5 \text{ МПа}$. По полученной компрессионной зависимости был рассчитан коэффициент сжимаемости хвостов a , который составил $9,27 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$.

Определение угла естественного откоса α производилось методом насыпки воронкой на горизонтальную поверхность сухих и влажных хвостов с $W = 10 \text{ %}$. Значения α составили соответственно $31,7^\circ$ и $33,4^\circ$. При этом рассчитанное по эмпирической формуле значение угла внутреннего трения составило $\varphi = 29,52^\circ$. Определенные свойства и характеристики хвостов использовались в работе для расчетов коэффициентов запаса устойчивости техногенных массивов и определения оптимальной конфигурации откосов хранилищ.

Дальнейшие исследования включали компьютерное каркасное моделирование хранилищ отходов переработки железорудного сырья при их складировании на основания, являющихся типичными для условий АО «Карельский окатыш» формами рельефа. Сначала с помощью географической информационной системы QGIS создавались изолинии высот (рисунок 1а), которые затем были преобразованы в набор точек для импорта в горно-геологическую информационную систему Micromine Origin & Beyond 2022.5 с целью создания ЦМП – цифровой модели поверхности (рисунок 1б). Цифрами на рисунке 1б обозначены номера выбранных площадок складирования хвостов 39 км² каждое.

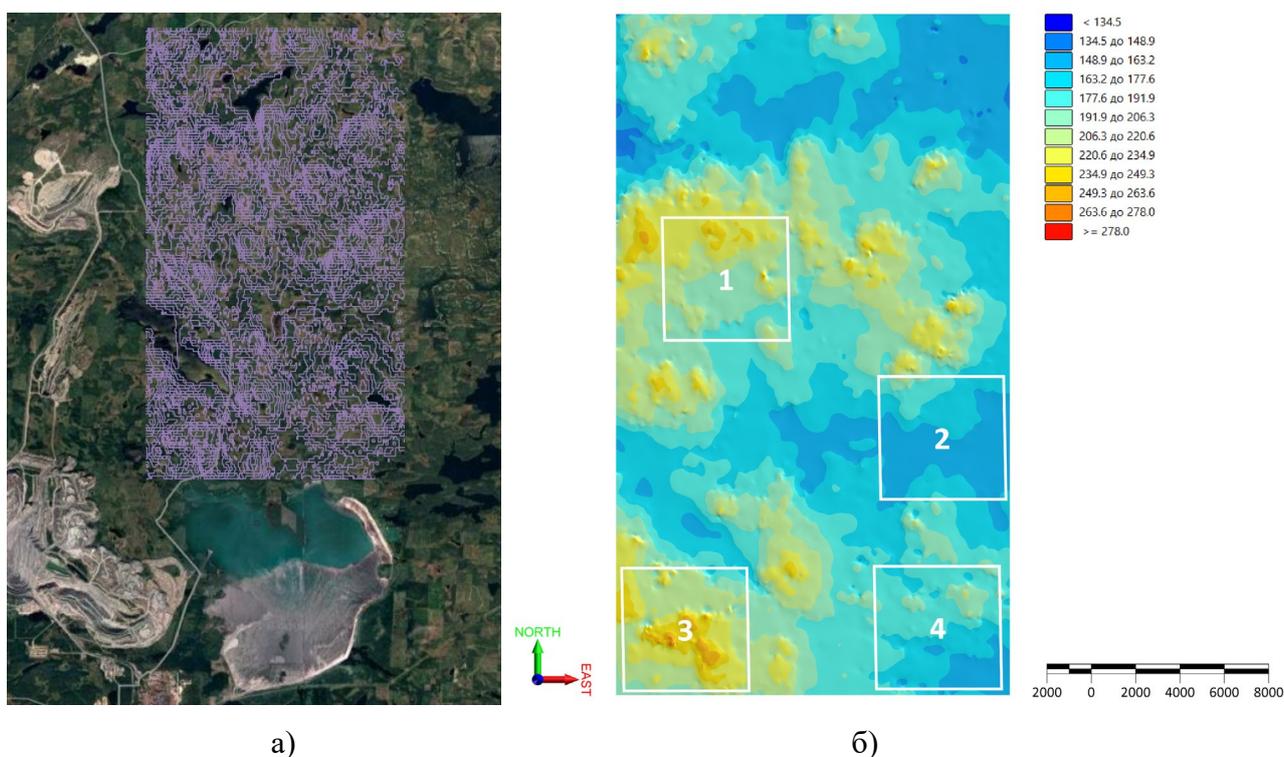


Рисунок 1 – Этапы моделирования рельефа площадок складирования хвостов
 а – изолинии поверхности в QGIS; б – контуры хранилищ на ЦМП в Micromine

Далее было проведено моделирование ограждающих дамб высотой 31 м, углами внутреннего и внешнего откосов 11,3° и 26,6° соответственно, шириной гребня 13 м. Тела массивов хвостов заключались между верхними бровками внутренних откосов дамб. Вид смоделированных хранилищ в разрезе представлен на рисунке 2.

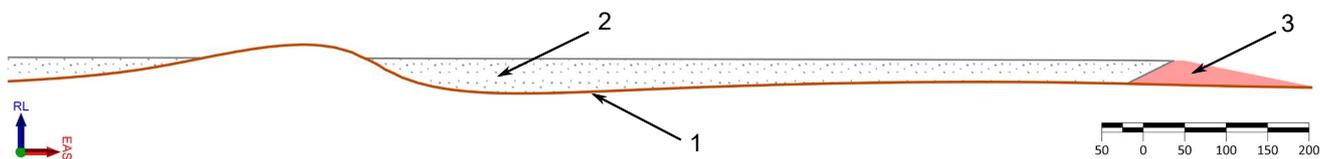


Рисунок 2 – Поперечный разрез хранилища № 1, восточная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

По результатам моделирования можно заключить, что наибольшей вместимостью в 1171,248 млн м³ хвостов обладает хранилище № 2, возводимое на относительно ровном участке, с минимальным перепадом абсолютных средних отметок высоты (15 м) среди рассмотренных вариантов и плавным понижением рельефа с запада на восток. Результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры смоделированных хранилищ

<i>Параметры хранилищ</i>	<i>Номер хранилища (см. рисунок 1)</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Минимальная мощность тела массива, м	0	16	0	3
Максимальная мощность тела массива, м	45	42	51	55
Объем ограждающей дамбы, млн м ³	88,864	95,984	78,837	93,479
Объем тела массива, млн м ³	995,624	1171,248	618,546	1080,826

Однако при складировании водонасыщенных отложений необходимо учитывать количество воды, поступающее вместе с хвостами. Целесообразнее сравнить вместимость хранилищ по твердой части хвостов. При складировании обезвоженных до $W = 10\%$ хвостов коэффициент водонасыщения S_r в среднем равен 0,3. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение объемов при складировании хвостов разной степени водонасыщенности

<i>Параметры хранилищ</i>	<i>Номер хранилища (см. рисунок 1)</i>			
	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Вместимость хранилища V , млн м ³	995,624	1171,248	618,546	1080,826
Объем хвостов при $S_r = 0,8$, млн м ³	619,378	728,633	384,797	672,382
Объем воды при $S_r = 0,8$, млн м ³	376,246	442,615	233,749	408,444
Объем хвостов при $S_r = 0,3$, млн м ³	851,258	1001,417	528,857	924,106
Объем воды при $S_r = 0,3$, млн м ³	144,366	169,831	89,689	156,720

Хранилища, сложенные отложениями с коэффициентом водонасыщения менее 0,5, позволяют вместить прежний объем хвостов на меньшей площади и/или увеличить высоту массива вследствие более высоких прочностных свойств материала. Для оценки экономии территории рассмотрим возведение массива глубоко обезвоженных хвостов на рельефе № 1,

параметры ограждающей дамбы прежние. Был смоделирован массив со средней мощностью отложений 50 м. Ограждающие дамбы в данном случае требуются для предотвращения растекания массива хвостов в случае их возможного переувлажнения и перехода в водонасыщенное и подвижное состояние. Поэтому возведение дамбы требуется только в наиболее низкой части рельефа хранилища. Вид хранилища в плане и разрез тела массива глубоко обезвоженных хвостов представлены на рисунке 3. В таблице 3 приведены параметры оптимизированного хранилища.

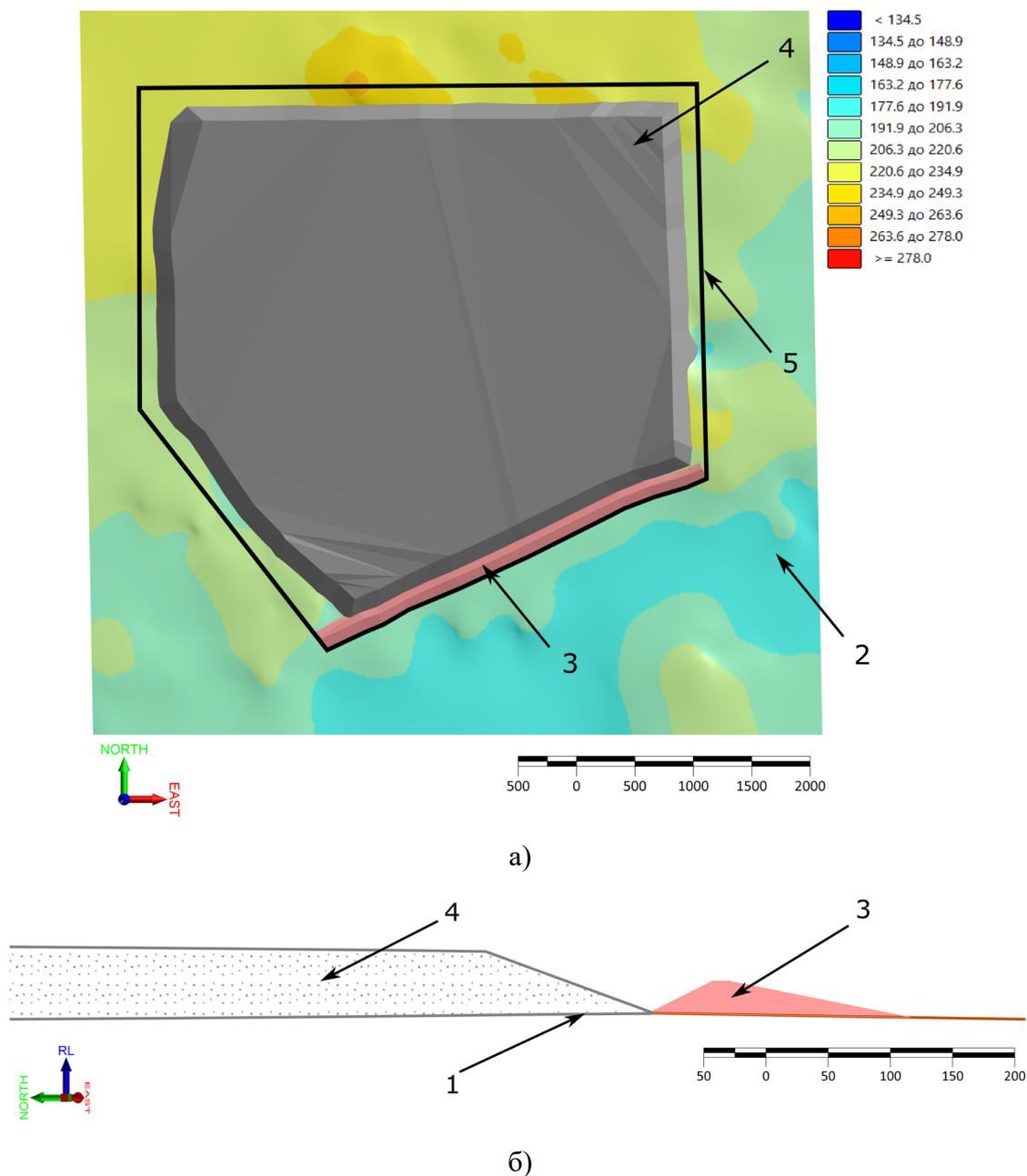


Рисунок 3 – Общий вид оптимизированного хвостохранилища на рельефе № 1

а – в плане; б – в разрезе

1 – основание хранилища; 2 – ЦМП основания хранилища; 3 – ограждающая дамба;
4 – тело массива (хвосты); 5 – контур хранилища

Таблица 3 – Параметры оптимизированного хранилища на рельефе № 1

<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>
Площадь хранилища в пределах контура, км ²	21,83
Вместимость хранилища, млн м ³	796,761
Объем хвостов при $W = 10$ %, млн м ³	681,231
Объем дамбы, млн м ³	13,215
Площадь хранилища глубоко обезвоженных хвостов относительно хранилища водонасыщенных отложений, %	56,0
Вместимость хранилища глубоко обезвоженных хвостов относительно хранилища водонасыщенных отложений, %	110,0
Отношение объема дамбы к объему тела массива, доли ед.	0,017

Предлагаемое хранилище обеспечивает размещение 681,231 млн м³ хвостов, что на 10 % больше наливного хранилища, сложенного водонасыщенными техногенными отложениями. При этом площадь хранилища меньше на 44 % и имеет запас для повышения вместимости без отчуждения дополнительных территорий. При сравнении указанных хранилищ с возведением только одной южной ограждающей дамбы в наиболее низкой части рельефа объем земляных работ становится меньше на 36,72 % – отношение объемов дамбы к телу массива сокращается с 2,097 % до 1,659 %. Однако намывные хранилища, формируемые на данном рельефе, требуют возведения дамб с трех сторон во избежание растекания хвостов при их намыве. Поэтому максимальное сокращение объема дамб достигает значения 76,40 % – с 5,627 % до 1,659 % или более чем в 4,24 раза.

Можно сделать вывод, что целесообразно рассматривать разные формы рельефа для организации хранилищ отходов обогащения руд с различной концентрацией твердого в пульпе:

- складирование рядовых несгущенных пульп рекомендуется производить на рельефах № 1 или № 4 с организацией намыва от дамбы в сторону понижения рельефа;
- складирование сгущенных пульп рекомендуется производить на рельефах № 2 и № 3;
- складирование глубоко обезвоженных хвостов возможно на ровном рельефе, но целесообразнее площадкой хранилища выбирать рельеф № 3 как наиболее пересеченный и непригодный для ведения иной хозяйственной деятельности, или рельеф № 1.

Далее оценивалась устойчивость массивов, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов. Расчеты коэффициентов запаса устойчивости η откосов производились по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения методами алгебраического суммирования сил и многоугольника сил. Осуществлялся поиск наислабейшей кривой при различной конфигурации хранилища (высота массива, угол откоса, количество ярусов) и свойствах грунтов оснований. В таблице 4 приведены показатели физико-механических свойств обезвоженных хвостов и грунтов оснований.

Таблица 4 – Физико-механические свойства хвостов с $W = 10\%$ и грунтов оснований

	<i>Плотность ρ, кг/м³</i>	<i>Угол внутреннего трения ϕ, градус</i>	<i>Сцепление C, кПа</i>
Хвосты неуплотненные	1590,0	29,5	0
Супесь дресвяная	2110,0	16,0	4,0
Супесь песчанистая	2150,0	36,0	27,0
Трещиноватые гранито-гнейсы	2640,0	35,0	100,0

На рисунке 4 показана зависимость изменения коэффициента запаса устойчивости от угла откоса массива высотой 50 м и свойств грунтов оснований. Зависимости для массивов высотой 30 и 100 м имеют аналогичный характер. По выявленным зависимостям были рекомендованы следующие максимальные углы откоса одноярусного массива обезвоженных до $W = 10\%$ хвостов: для массива $H = 30$ м – $26,9^\circ$ и $28,8^\circ$ соответственно при грунтах оснований «супесь песчанистая» и «трещиноватые гранито-гнейсы»; для массива $H = 50$ м – $26,5^\circ$ и $27,9^\circ$; для массива $H = 100$ м – $26,0^\circ$ и $27,0^\circ$.

Также стоит отметить, что с увеличением высоты массива характер кривой и тип оползня меняется: при малой высоте на исследованных грунтах оснований, как правило, развивается подошвенный или надподошвенный оползень с вхождением кривой скольжения максимально близко к верхней бровке. При высоте массива 100 м, углах откоса более 25° и складировании на грунты «супесь дресвяная» начало кривой скольжения располагается на расстоянии более 50 м от верхней бровки, развивается подподошвенный оползень с мощным продавливанием грунта основания.

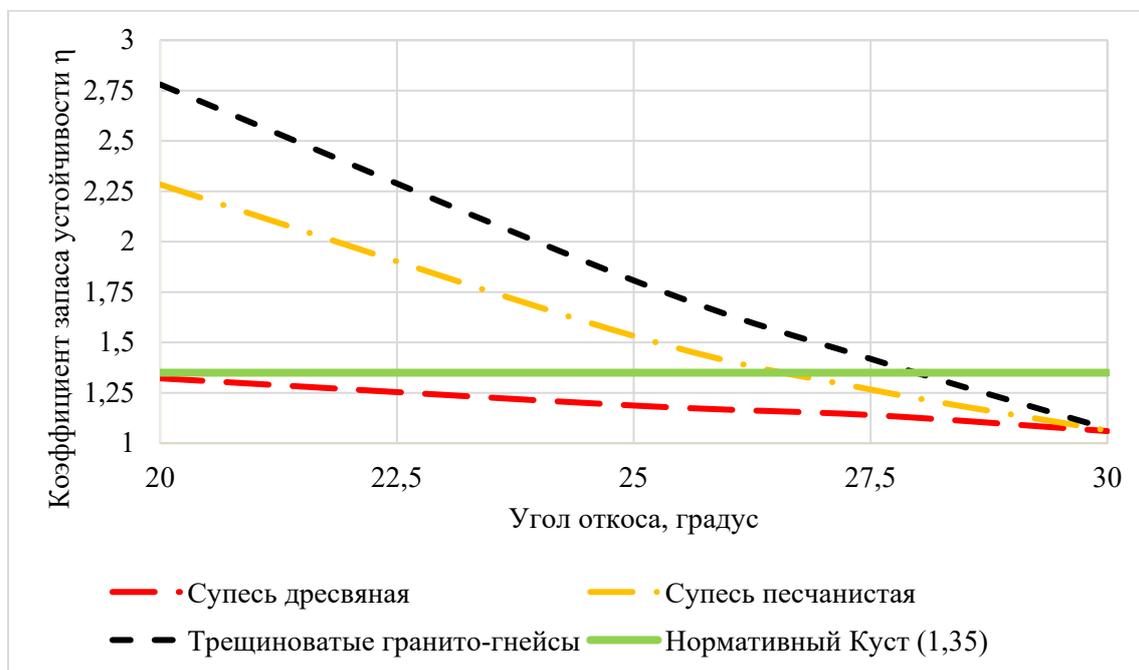


Рисунок 4 – Изменение коэффициента запаса устойчивости с увеличением угла откоса массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов при $H = 50$ м

Далее была рассмотрена возможность повышения устойчивости откосов путем изменения их конфигурации. Были смоделированы 8 массивов: двухъярусные при $H = 30$ и 50 м, и четырехъярусные при $H = 100$ м. Высота ярусов одинакова, ширина бермы – 12 м. Сравнивались коэффициенты запаса устойчивости, рассчитанные методом алгебраического суммирования сил. В таблице 5 показаны результаты расчетов; η_1 и η_2 – соответственно коэффициенты запаса до и после изменения конфигурации. Знаки «*», «_» и «+» в конце номера варианта и значений η обозначают соответственно супеси дресвяные, супеси песчанистые и трещиноватые гранито-гнейсы в основании сооружений. Можно заключить, что предложенные многоярусные хранилища обладают большим коэффициентом запаса устойчивости, превышающим нормативное значение во всех случаях кроме варианта № 5.

Таблица 5 – Коэффициенты запаса устойчивости η при изменении конфигурации хранилища

№	Высота хранилища H , м	Генеральный угол откоса одноярусного хранилища α_1 , градус	Генеральный угол откоса многоярусного хранилища α_2 , градус	η_1	η_2
1*	30	25	21,5	1,1950*	1,3788*
2+		29	25,1	1,0720+	2,0622+
3*	50	20	18,4	1,3221*	1,4470*
4_		27,5	24,8	1,2665_	1,6359_
5_		29	27,0	1,0632_	1,1170_
6+		29	27,0	1,0723+	1,4913+
7_	100	27,5	23,6	1,2388_	1,6778_
8+		27,5	23,6	1,3127+	1,8299+

Выполненные исследования позволяют заключить, что массивы, сложенные глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, обладают достаточным запасом устойчивости и обеспечивают размещение требуемого объема хвостов, при этом сокращается площадь нарушаемых территорий и снижается объем земляных работ по возведению ограждающих дамб в результате повышения плотности укладки складированного материала.

В третьей главе проведены исследования глубокого обезвоживания пульпы в вибрационной машине. Разработаны оптимальные режимы работы вибрационного аппарата, определены основные технические показатели процесса обезвоживания и предложены рациональные схемы складирования в хранилища предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Исследования проводились на опытном образце вибрационной машины, главным рабочим элементом которой является шестигранный барабан с перфорированными боковыми поверхностями, выполняющими функцию фильтра. В машине производилось глубокое

обезвоживание пульпы с массовым содержанием твердой фазы 3 %, 4,8 % и 45 %, имеющих плотность соответственно 1019,5 кг/м³, 1031,5 кг/м³ и 1401,3 кг/м³. В качестве фильтров использовались шпальтовое сито с размером ячеек 50–70 мкм и сетка серии Pyramid фирмы Derrick с ячейкой 43–45 мкм.

Частота возбуждаемых вибраций f изменялась от 5 до 70 Гц, амплитуда колебательной скорости v от 0,01 до 0,1 м/с. Перепад давления ΔP на фильтрах изменялся от 0,02 до 0,05 МПа. Исследования показали, что оптимальный частотный диапазон обработки отходов обогащения железистых кварцитов находится между значениями $f = 7–15$ Гц при $\Delta P = 0,05$ МПа. Оптимальный диапазон амплитуды колебательной скорости находится в пределах 0,07–0,09 м/с. Шпальтовое сито показывает более высокую производительность для всех трех пульп, достигая максимума 43–48 л/м²·с при $v = 0,09$ м/с. Максимальная производительность сетки Pyramid при $v = 0,09$ м/с находится в диапазоне 32–36 л/м²·с.

Анализ остаточной весовой влажности W показал, что средний показатель $W = 10$ %. Проведенные исследования позволяют рекомендовать внедрение технологий глубокого обезвоживания предварительно сгущенных пульп в предлагаемой вибрационной машине в условиях АО «Карельский окатыш». Среднегодовой объем складирования сухих хвостов в хранилище составляет 14,6 млн м³. При среднем расходе сгущенной пульпы в 2537,1 м³/час для стабильного ведения процесса глубокого обезвоживания потребуется 13 машин производительностью 250 м³/час каждая, 2 из которых в резерве.

За проектные 20 лет поступающий на глубокое обезвоживание объем пульп составит 211,5 млн м³, при этом масса хвостов с $W = 10$ % составит 306,6 млн т. Таким образом, внедрение предлагаемой технологии обеспечивает складирование 65,78 % общего объема образующихся за год отходов обогащения железистых кварцитов.

Целесообразно рассмотреть способы размещения глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов в условиях АО «Карельский окатыш». Были проанализированы несколько схем складирования, отличающихся рельефом и местом установки оборудования. Организация подобного хранилища подразумевает использование системы конвейерных лент для транспортирования хвостов от вибрационной машины к специальному укладчику – конвейеру-стакеру. Ниже на рисунках 5–8 представлены оптимальные схемы.

В соответствии с рисунком 5 стакер последовательно движется вдоль дамбы. При достижении определенной мощности слоя возможно уплотнение слоя хвостов бульдозерной техникой, установка стакера на уплотненные хвосты и дальнейшее наращивание высоты массива по прежнему маршруту.

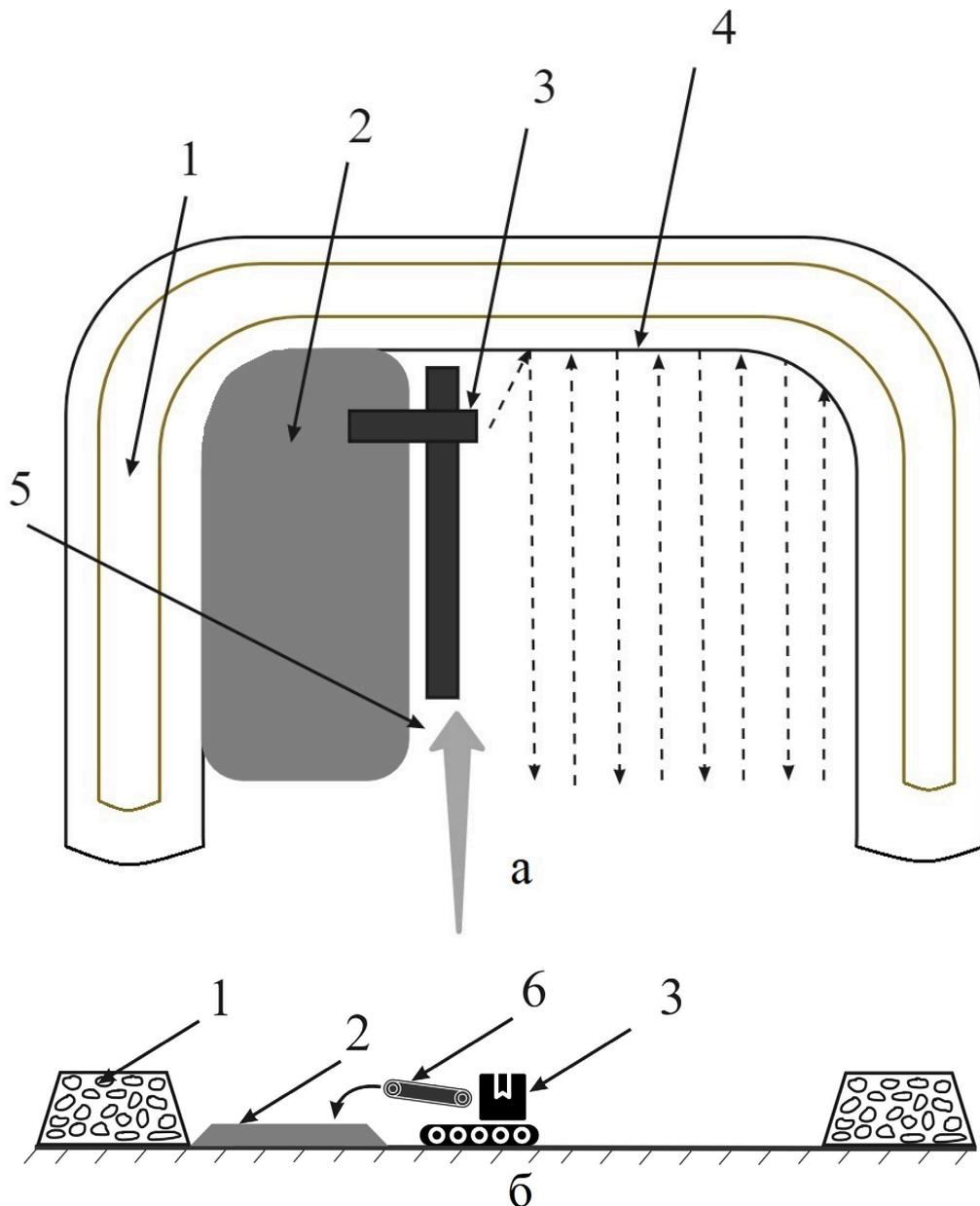


Рисунок 5 – Схема послойного формирования первого яруса хранилища с основания
а – вид сверху; б – вид сбоку

1 – ограждающая дамба; 2 – обезвоженные хвосты; 3 – система транспортирующих лент/мобильный конвейер-стакер; 4 – контур площадки складирования;
5 – питание от вибрационной машины; 6 – система выпускающих лент

Рисунок 6 иллюстрирует формирование последующих ярусов массива при полном заполнении выделенной территории хвостами. Данный способ делает возможным целенаправленное формирование ярусов с обеспечением нормативного коэффициента запаса устойчивости при необходимой конфигурации откосов. При таком способе возможно складирование на ранних этапах без ограждающих дамб, так как высота массива не будет превышать нескольких метров.

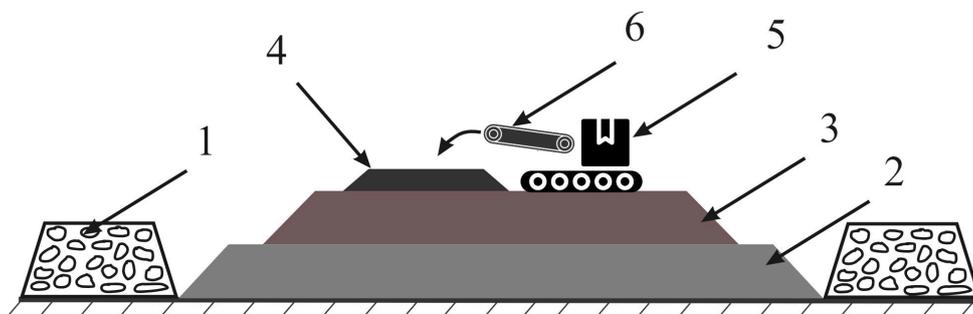


Рисунок 6 – Схема послойного формирования последующих ярусов хранилища с основания
 1 – ограждающая дамба; 2, 3 – первый и второй слой обезвоженных хвостов; 4 – формируемый
 слой обезвоженных хвостов; 5 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер;
 6 – система выпускающих лент

В условиях АО «Карельский окатыш» наиболее целесообразной схемой возведения хранилища обезвоженных отходов переработки железорудного сырья является укладка конвейерным транспортом с косогора «по склону». Высота защитной дамбы определяется вместимостью хранилища и должна быть не меньше средней мощности слоя отложений. Рассмотрим две оптимальные схемы складирования глубоко обезвоженных хвостов по предлагаемой технологии в условиях АО «Карельский окатыш». Первая схема складирования «по склону» приведена на рисунке 7.

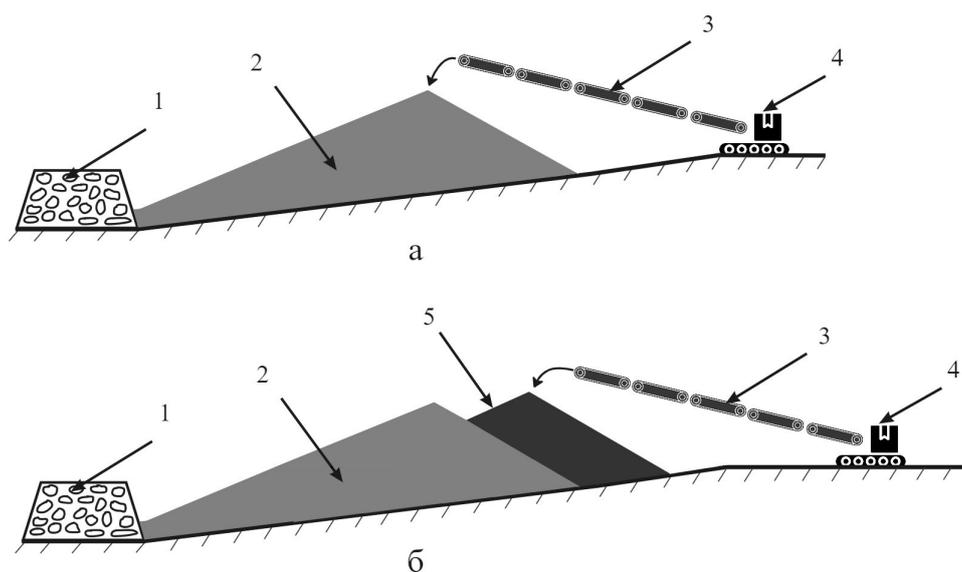


Рисунок 7 – Схема складирования «по склону» с перемещением укладчика
 а – формирование первого слоя; б – формирование последующих слоев

1 – ограждающая дамба; 2 – первый слой обезвоженных хвостов;
 3 – система выпускающих лент; 4 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер;
 5 – второй слой обезвоженных хвостов

По данной схеме укладчик устанавливается на верхней бровке уступа (рисунок 7а). При достижении первым слоем проектной высоты укладчик перемещается в направлении от дамбы на новое место, откуда формируется второй слой (рисунок 7б). Последующие слои формируются аналогичным образом до заполнения площадки хранилища. Нарращивание длины выпускающих лент не требуется.

Вторая схема, представленная на рисунке 8, подразумевает минимальное перемещение укладчика по оси x и наращивание высоты массива путем увеличения длины выпускающих лент. При организации складирования по схеме, показанной на рисунке 8, возможен выпуск хвостов в обе стороны понижения рельефа – либо одновременно, либо попеременно.

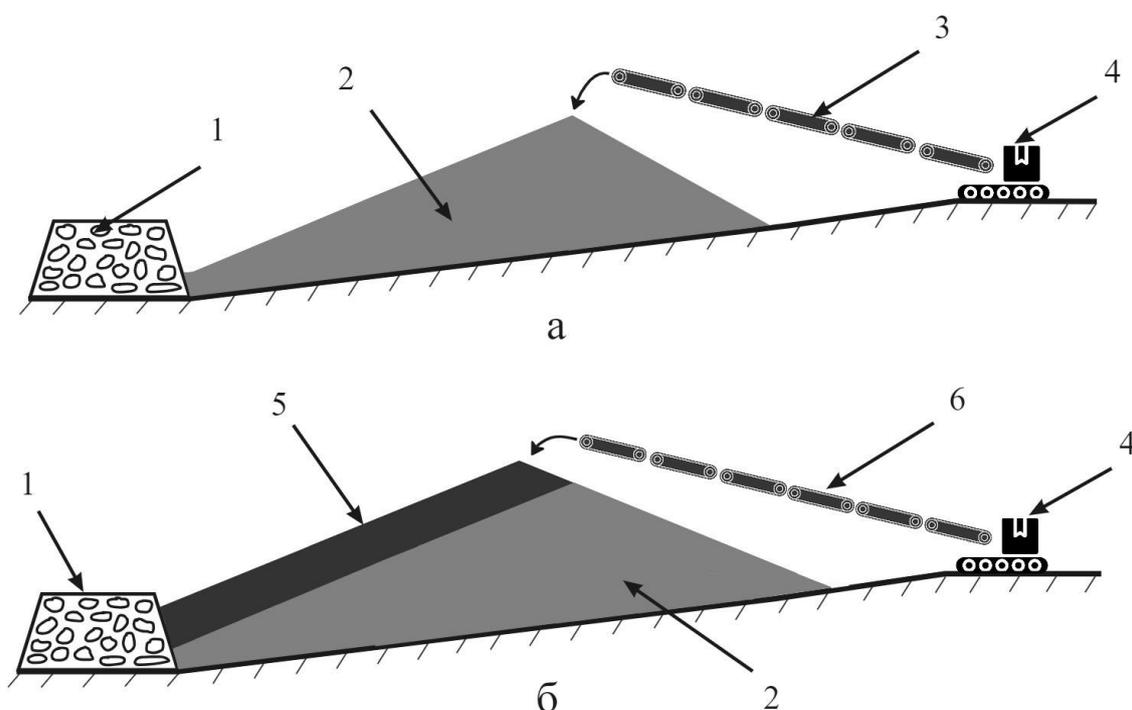


Рисунок 8 – Схема складирования «по склону» с наращиванием длины выпускающей ленты

а – формирование первого слоя; б – формирование последующих слоев

1 – ограждающая дамба; 2 – первый слой обезвоженных хвостов; 3 – начальная система выпускающих лент; 4 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер;

5 – второй слой обезвоженных хвостов; 6 – увеличенная система выпускающих лент

По схемам на рисунках 7 и 8 выпуск обезвоженных хвостов осуществляется с превышения в направлении ограждающих дамб. Перемещение оборудования для укладки обезвоженных хвостов возможно в любом горизонтальном направлении. Это позволяет равномерно заполнять емкость хранилища и изменять точку выпуска хвостов. Предельный угол откосного сооружения определяется углом естественного откоса складированного материала. При укладке «по склону» возможна организация послойного складирования с отсыпкой в направлении от дамбы по схеме, показанной на рисунке 5.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальные режимы обработки пульпы в предлагаемой вибрационной машине и предложить схему складирования хвостов на земной поверхности, включающую предварительное сгущение пульпы, ее подачу в вибрационную машину для глубокого обезвоживания и дальнейшее транспортирование в хранилище системой конвейерных лент с укладкой хвостов послойно или «по склону».

В четвертой главе приведены результаты систематизации исследований, посвященных классификации и типизации экзогенных геологических процессов и развития горно-геологических явлений (ГГЯ) в массивах пород различного происхождения. Это позволило произвести дифференциацию явлений и разработать четырехуровневую классификацию ГГЯ, активизация и развитие которых наиболее вероятно при формировании и эксплуатации массивов, сложенных отходами переработки железорудного сырья.

В таблице 6 приведена упрощенная классификация наиболее вероятных горно-геологических явлений, возникающих при формировании хранилищ отходов переработки железорудного сырья в условиях АО «Карельский окатыш».

Было установлено, что наиболее частыми факторами развития негативного процесса являются гидрогеологические: взвешивание частиц в результате перехода отложений в водонасыщенное состояние, фильтрационный вынос частиц в результате установления техногенного водоносного горизонта в теле массива и другие. Используемый подход при систематизации опасных ГГЯ позволяет строить деревья возможных исходов для каждого объекта и оценивать риски проявления конкретного негативного процесса, вызванного природными или техногенными факторами.

Для качественного управления состоянием горнотехнических сооружений необходим механизм для оценки степени влияния конкретного фактора на устойчивость массива. Необходимые для оценки состояния горнотехнического объекта характеристики были разделены на четыре типа в зависимости от скорости изменения их показателей во времени:

- «Динамические» – значения параметров измеряются минимум один раз в сутки;
- «Квазидинамические» – для обеспечения достоверности информации и необходимой точности квазидинамические параметры необходимо измерять от одного раза в неделю до нескольких раз в год;
- «Квазистатические» – значения данных параметров необходимо измерять один раз в несколько лет;
- «Статические» – устанавливаются один раз при проектировании объекта.

Таблица 6 – Классификация горно-геологических явлений в массивах отходов переработки железорудного сырья АО «Карельский окатыш»

<i>Класс</i>	<i>Подкласс</i>	<i>Тип</i>	<i>Факторы</i>	<i>Результат</i>
Фильтрационное разрушение	Оплывание намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Оплывины Консистентные оплывины Фильтрационные оплывины	Водонасыщенное состояние отложений	Гидродинамическая авария в результате течения водонасыщенных отложений, разрушение дамб
			Давление пульпы	
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Высокопористые и сильносжимаемые отложения	
Фильтрационное разрушение	Суффозия намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Внутренняя суффозия Внешняя суффозия	Гранулометрический состав	Гидродинамическая авария в результате суффозионного выноса или перемещения материала, разрушение дамб
			Давление пульпы	
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Вынос песчаных частиц	
Фильтрационное разрушение	Подмыв и разрушение откосов намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Промоины и размыв откоса поверхностными водами	Атмосферные осадки	Разрушение дамб
			Движение потока жидкости	
			Вынос частиц	
Оползень	Оползень дамбы намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба в сторону низового откоса	Надподошвенный оползень Пододошвенный оползень Подпододошвенный оползень	Давление пульпы	Переход части массива в водонасыщенное состояние вследствие снижения пористости и ухудшения фильтрационных свойств дамб
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Суффозия	
			Снижение пористости материалов	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Надподошвенный оползень	Атмосферные осадки	Оползание вследствие чрезмерной нагрузки и переувлажнения верхней части массива
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Перегрузение	

<i>Класс</i>	<i>Подкласс</i>	<i>Тип</i>	<i>Факторы</i>	<i>Результат</i>
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Подошвенный оползень	Снижение пористости отложений	Переход слоя отложений в водонасыщенное состояние, образование поверхности ослабления, капиллярное поднятие жидкости и переувлажнение грунтов оснований, тиксотропное разжижение отложений
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Водоносный горизонт в основании	
			Суффозия	
			Прочностные характеристики грунтов оснований	
			Гранулометрический состав отложений	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Подподошвенный оползень	Гидростатическое взвешивание частиц	Капиллярное поднятие жидкости и переувлажнение грунтов оснований, оползневая деформация массива
			Прочностные характеристики грунтов оснований	
			Перегружение массива	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Оползень выдавливания Оползень оплывания Оползень проседания	Переувлажненные глинистые породы в основании или теле массива	Оползневая деформация массива
			Водонасыщенное состояние отложений	
			Сильносжимаемые грунты основания	
Просадочные явления	Просадка массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Просадка массива нарушенной структуры	Увлажнение отложений	Деформация откоса
			Уплотнение отложений	
			Наличие слабого основания	

Применение разработанной типизации позволяет обосновать периодичность получения данных о состоянии горнотехнического сооружения по «весу» или «вкладу» значения той или иной характеристики в интегральную оценку состояния объекта.

Это позволило разработать рекомендации по периодичности сбора информации о показателях свойств массивов и грунтов оснований хранилищ. Основным контролируемым гидрогеологическими и инженерно-геологическими параметрами являются уровень воды в контрольных скважинах и физико-механические свойства отложений, слагающих массив и основания хранилищ. Периодичность собираемых данных изменяется в зависимости от состояния окружающей среды и характера работ по формированию и эксплуатации хранилищ:

- стационарный режим – штатное ведение намывных или отвальных работ при климатической норме для данного региона;
- нестационарный режим – нештатное изменение технологии намыва или отвалообразования и интенсивности работ; резкая перемена климатических условий, рост интенсивности атмосферных осадков, изменение характера и продолжительности осадков, изменение режима поверхностного стока.

В зависимости от объекта и наиболее вероятных для них негативных горно-геологических явлений было предложено проводить инженерно-геологические исследования 1 раз в 5 лет при стационарном режиме для всех исследованных объектов и усиливать контроль до 1 раза в год при развитии фильтрационных и оползневых процессов в намывных массивах хвостохранилищ.

Сбор и обработку гидрогеологических данных о состоянии хранилищ предварительно глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья в стационарном режиме необходимо проводить от 1 раза в 14 дней до 1 раза в месяц с увеличением частоты вдвое при нештатных ситуациях. Контроль массивов, склонных к фильтрационному разрушению откосов, рекомендуется производить еженедельно и ежедневно соответственно при стационарном и нестационарном режимах формирования и эксплуатации хранилищ.

Для безопасного формирования и эксплуатации хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов необходима организация комплексного мониторинга состояния, включающего инструментальные измерения, в том числе автоматизированные, полевые и лабораторные исследования свойств отложений и грунтов оснований. Необходимый объем информации достигается путем сбора данных посредством инженерно-геологического, гидрогеологического, деформационного и технологического мониторинга.

На рисунке 9 показано расположение исследовательских скважин для сбора информации о состоянии смоделированного хранилища площадью 21,83 км² и средней мощностью слоя 50 м. В таблице 7 приведена периодичность сбора информации о состоянии массива. Информация о рельефе, климате и конфигурация хранилища устанавливается при разработке проекта и влияет на выбор степени обезвоживания складированных хвостов и максимальную вместимость.

Цель инженерно-геологического мониторинга – изучение строения, состава и свойств грунтов оснований и дамб обвалования, техногенных отложений; геодинамических процессов и явлений, сопровождающих формирование и функционирование горнопромышленной природно-техногенной системы. Гидрогеологический мониторинг состояния необходим для наблюдений за изменением гидрогеомеханических и гидродинамических процессов, развивающихся в техногенном массиве; гидродинамическим режимом подземных вод; фильтрационными процессами при установлении техногенного водоносного горизонта в теле массива.

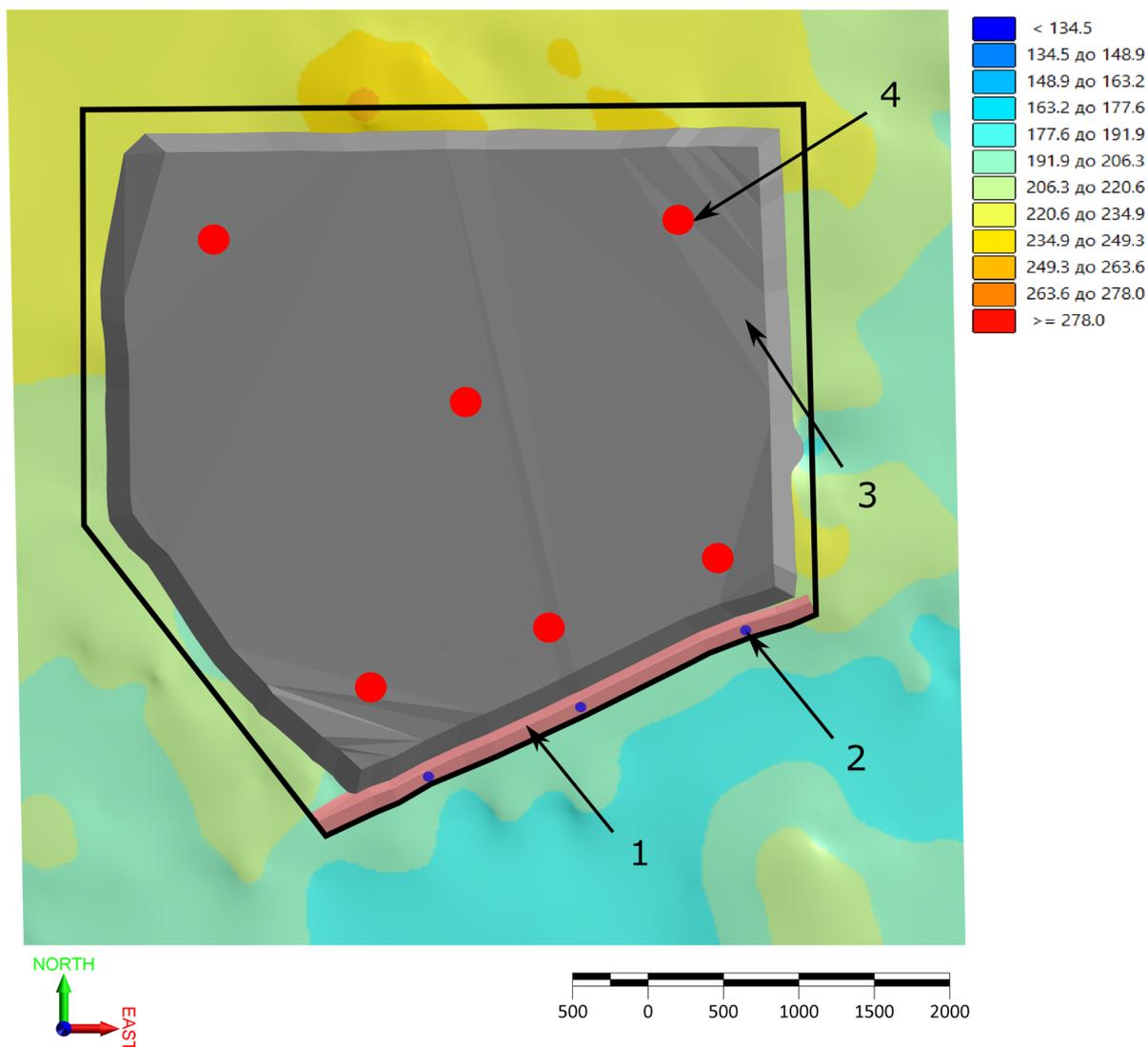


Рисунок 9 – Схема расположения наблюдательных и исследовательских скважин хранилища предварительно глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов
 1 – ограждающая дамба; 2 – гидрогеологические наблюдательные скважины;
 3 – тело массива (хвосты); 4 – исследовательские скважины

Таблица 7 – Периодичность сбора информации о состоянии массива, сложенного предварительно глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов

<i>Параметр</i>	<i>Тип параметра</i>	<i>Вид мониторинга</i>	<i>Периодичность измерений</i>
Рельеф	Статический	-	1 раз при выборе площадки хранилища
Климат	Статический	-	1 раз при выборе площадки хранилища
Конфигурация хранилища	Статический	-	1 раз при разработке проекта
Физико-механические свойства техногенных отложений	Квазистатический	Инженерно-геологический	Раз в 5 лет при условии низкой сжимаемости отложений
Физико-механические свойства грунтов основания	Квазистатический	Инженерно-геологический	То же, что и для техногенных отложений
Физико-механические свойства хвостов	Квазидинамический	Инженерно-геологический	Раз в полгода или при изменении технологии обогащения
Уровень воды на границе основание–массив	Квазидинамический	Гидрогеологический	1 раз в месяц
Уровень воды в теле дамбы	Квазидинамический	Гидрогеологический	1 раз в месяц
Визуальные наблюдения деформаций	Динамический	Деформационный	1 раз в неделю
Объем складирования	Динамический	Технологический	Ежедневно
Соответствие конфигурации хранилища проекту	Динамический	Технологический	Ежедневно

Результаты сбора информации посредством мониторинга используются для расчета интегрального показателя состояния массива с помощью программных средств и выработки дальнейших мероприятий по обеспечению его устойчивости в случае нахождения массива в предельном состоянии. Таким образом, проведенные исследования позволили разработать систему мониторинга и управления состоянием хранилищ предварительно глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований изменения свойств отходов обогащения железистых кварцитов и поведения сложенных ими массивов под влиянием природных и технологических факторов решена актуальная научная задача формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, что имеет важное значение для обеспечения эффективности и безопасности их сооружения и эксплуатации.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Показано, что имеющие наибольшее распространение хранилища отходов переработки железорудного сырья, относящиеся к намывному типу, чаще всего подвержены разрушениям и деформационным явлениям, поэтому перспективным выглядит отказ от складирования пульп с низкой концентрацией твердого и переход к складированию сгущенных или глубоко обезвоженных хвостов.

2. Проведенные испытания физико-механических свойств хвостов мокрой магнитной сепарации Костомукшского железорудного месторождения показали, что исследуемый материал представлен мелкозернистыми неоднородными слабосжимаемыми песками и имеет следующие усредненные характеристики: плотность $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi = 29,5^\circ$.

3. Определены основные физико-географические, инженерно-геологические, гидрогеологические и технологические факторы, влияющие на устойчивость и вместимость хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов. Установлено, что учет особенностей рельефа местности при складировании предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов позволяет сократить площадь, занимаемую хранилищем, до 45 %.

4. На основе компьютерного моделирования получены зависимости коэффициента запаса устойчивости хранилищ глубоко обезвоженных хвостов от характеристик грунтов оснований (угол внутреннего трения, сцепление, плотность), значения угла откоса, высоты массива и его конфигурации.

5. Проведенное исследование процесса глубокого обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов в модифицированной вибрационной машине с получением хвостов с остаточной весовой влажностью 8–11 % позволило определить оптимальные динамический и частотный диапазоны колебаний, обеспечивающие наиболее эффективную работу оборудования.

6. Разработана технологическая схема складирования предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов в условиях предприятия АО «Карельский окатыш», включающая предварительное сгущение пульпы, ее подачу в вибрационную машину для

глубокого обезвоживания и дальнейшее транспортирование в хранилище системой конвейерных лент с укладкой хвостов послойно или «по склону».

7. Разработана четырехуровневая классификация негативных горно-геологических явлений, свойственных массивам отходов переработки железорудного сырья, позволяющая построить дерево возможных исходов при анализе состояния массивов и разработать систему мониторинга состояния хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

8. Создана система контроля состояния хранилищ отходов переработки железорудного сырья, позволяющая обосновать необходимую периодичность получения инженерно-геологических и гидрогеологических данных.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. Куренков Д.С. Инженерно-геологическое обоснование технологии глубокого обезвоживания отходов обогащения железных руд // Горная промышленность. – 2023. – № 1. – с. 57-62. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-57-62

2. Ческидов В.В., Куренков Д.С., Маневич А.И. Современные методы и средства оперативного контроля на горных предприятиях для обеспечения экологической и промышленной безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – с. 188-199

3. V. Cheskidov, H. Grobler, D. Kurenkov, A. Lipina. Slope Monitoring Systems Design for Mining Enterprises // E3S Web Conf. 174 01025 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017401025

4. V.V. Cheskidov, A.V. Lipina, A.I. Manevich & D.S. Kurenkov. Status Monitoring of Sloping Structures // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – London: CRC Press, 2019. – pp. 41-47. DOI: 10.1201/9780429398063

В прочих изданиях:

5. Kurenkov D.S., Kirichenko Yu.V. Status Management of Man-Made Massifs to Enhance Operational Efficiency of Mining Waste Storages // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific conference abstracts, Saint-Petersburg, 2021. – pp. 179-180

6. Kurenkov D.S. Experience of Engineering-Geological Monitoring Systems Use on Mining Enterprises // Scientific Reports on Resource Issues: Conference proceedings, Freiberg, 2017. – Vol. 1. – pp. 19-22

7. Куренков Д.С. Оценка временной изменчивости свойств горных пород // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. – 2017. – Vol. 5. – № 2. – с. 54-60. DOI: 10.2205/2017BS045

8. Куренков Д.С. Системы комплексного мониторинга горнотехнических сооружений // Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых 19-21 апреля 2017. Сборник научных трудов, часть II, Санкт-Петербург. – с. 199