

На правах рукописи

Поморцева Анастасия Александровна



**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ НА
УЧАСТКАХ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА**

*Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазо-
промысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело
и геометрия недр*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат геолого-минералогических наук

Поспехов Георгий Борисович

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор;

Жабко Андрей Викторович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра маркшейдерского дела, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу», г. Белгород.

Защита диссертации состоится **23 сентября 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, аудитория № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с сокращением объемов запасов богатых золотосодержащих руд возникает потребность вовлечения в переработку забалансовых руд с низким содержанием золота, что позволяет значительно расширить сырьевую базу добычи благородных металлов предприятий минерально-сырьевого комплекса России. Технология кучного выщелачивания обеспечивает наиболее эффективное и рентабельное извлечение золота из некондиционного сырья. В пределах Куранахского рудного поля, параллельно с фабричным извлечением, развивается технология кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых руд со средним содержанием золота 0,7 г/т, и общими подтвержденными запасами на территории более 500 т. Помимо этого, данная технология имеет большие перспективы применения для переработки существующих отвалов золотодобывающих предприятий, содержащих концентрации золота, которые ранее считались некондиционными.

При проектировании и эксплуатации многоярусных штабелей кучного выщелачивания золота первоочередное значение имеет обеспечение устойчивости техногенного массива, что гарантирует способность сооружения функционировать в нормальном режиме с заданными параметрами в течение всего срока службы. В настоящее время вопросы формирования и изменения свойств при эксплуатации техногенных массивов штабелей, подлежащих выщелачиванию золота из окомкованных бедных песчано-глинистых руд куранахского типа недостаточно изучены, поскольку технология кучного выщелачивания получила широкое распространение только в начале 80-х годов за рубежом, а в 90-х годах и в нашей стране.

Штабели кучного выщелачивания представляют собой насыпные сооружения, для обеспечения устойчивости которых в процессе эксплуатации большое значение имеют инженерно-геологические факторы. Недостаточный учет этих факторов может стать причиной развития различных деформаций техногенного массива, а также невозможности его эффективной эксплуатации с целью извлечения золота. Таким образом, инженерно-геологическое обеспечение устойчивости техногенных массивов

на участках кучного выщелачивания золота **является актуальной научной задачей.**

Степень разработанности темы исследования. Вопросам комплексного развития и интенсификации применения технологии кучного выщелачивания, а также формирования рудных штабелей посвящены труды Бочарова В.А., Воробьева А.Е., Дементьева В.Е., Зеленова В.И., Куркова А.В., Крыловой Г.С., Лушников Я.В., Санакулова К.С., Седельниковой Г.В., Секисова А.Г., Татаурова С.Б., Тчаро Х., Фазлуллина М.И., Чантурия В.А., Чекушиной Т.В. и других авторов.

Вопросам оценки устойчивости отвалов, формирования техногенных массивов и инженерно-геологическому изучению природно-технических систем посвящены работы Бабелло В.А., Бахасовой С.П., Гальперина А.М., Дашко Р.Э., Жабко А.В., Зотеева О.В., Иванова И.П., Кириченко Ю.Н., Киянца А.В., Кутепова Ю.И., Кутеповой Н.А., Мосейкина В.В., Певзнера М.Е., Протасова С.И., Сергиной Е.В., Фисенко Г.Л., Шпакова П.С. и других авторов.

Существующий опыт инженерно-геологического обеспечения устойчивости откосных сооружений не охватывает вопросы формирования и изменения свойств техногенных массивов кучного выщелачивания золота из окомкованных песчано-глинистых руд в процессе их эксплуатации, определяющие их деформационное поведение.

Объект исследования – техногенный массив штабеля окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа.

Предмет исследования – состав, свойства и процессы формирования техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота.

Цель диссертационной работы – повышение устойчивости техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота при их формировании и промышленной эксплуатации.

Идея диссертационной работы заключается в том, что повышение устойчивости массива штабеля кучного выщелачивания

достигается с помощью комплексного инженерно-геологического подхода, учитывающего прогноз и изменение свойств, техногенного гидродинамического режима и напряженно-деформированного состояния массива золотосодержащих руд на различных этапах его формирования и эксплуатации.

Основные задачи исследования:

1. Анализ и обобщение опубликованных материалов по инженерно-геологическому изучению техногенных массивов на участках кучного выщелачивания золота.

2. Изучение состава, фильтрационных и физико-механических свойств песчано-глинистых окомкованных золотосодержащих руд куранахского типа.

3. Прогноз техногенного гидродинамического режима в штабеле кучного выщелачивания при его эксплуатации.

4. Оценка и прогноз развития напряженно-деформированного состояния массива штабеля на участках кучного выщелачивания золота.

5. Разработка рекомендаций по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости техногенного массива штабеля на участках кучного выщелачивания.

Научная новизна работы:

Впервые проведены укрепленно-лабораторные и опытно-фильтрационные исследования окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа.

Установлены общие закономерности формирования и изменения строения и свойств техногенных массивов штабелей кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд на разных этапах их формирования и эксплуатации.

Разработан комплексный подход к инженерно-геологическому обеспечению устойчивости техногенных массивов штабелей кучного выщелачивания золота, на основе прогноза и мониторинга их гидродинамического режима и напряженно-деформированного состояния.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.3.

Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр по пунктам: 4, 9, 12, 14, 15, 17.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснованы оптимальные параметры техногенного массива штабеля на участке кучного выщелачивания золота и интенсивность его орошения.

2. Разработано, апробировано и запатентовано устройство для определения характеристик песчано-глинистых окомкованных руд, которое может быть использовано для оценки геотехнических и фильтрационных параметров окомкованных руд, подлежащих переработке методом кучного выщелачивания.

3. Получен акт внедрения результатов кандидатской диссертации от 16.06.2022, подтверждающий, что результаты диссертации использованы АО «Полюс Алдан» при обосновании оптимальных параметров формирования и эксплуатации многоярусных штабелей промышленного комплекса кучного выщелачивания.

4. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке проектов кучного выщелачивания в пределах куранахского рудного поля и на других объектах. А также внедрены в учебный процесс при освоении дисциплин: «Инженерная геология месторождений полезных ископаемых», «Математические методы в инженерной геологии», «Инженерно-геологические изыскания».

Методология и методы исследования. Обобщение и анализ опубликованных результатов отечественных и зарубежных авторов, специализирующихся на изучении устойчивости техногенных массивов, проведение и анализ лабораторных и экспериментальных исследований включая методы физического моделирования, полевые опытно-фильтрационные работы, а также численное моделирование и сопоставление результатов исследований с натурными данными.

На защиту выносятся научные положения:

1. Песчано-глинистые окомкованные руды являются специфическими техногенными грунтами, характеризующимися значительным снижением прочности окатышей до практически

нулевых значений и резким уменьшением коэффициента фильтрации при полном водонасыщении вследствие взаимодействия с технологическими растворами, что необходимо учитывать при прогнозе устойчивости многоярусных штабелей на участках кучного выщелачивания золота.

2. Фильтрационная неоднородность техногенного массива в штабелях кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа определяется сегрегацией рудного материала при его отсыпке и последующими изменениями структуры массива в процессе орошения технологическими растворами.

3. Прогноз техногенного гидродинамического режима при обосновании оптимальной интенсивности орошения окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания должен осуществляться на основе моделей ненасыщенной фильтрации с учетом калибровки их параметров с помощью укрупненно-лабораторных испытаний.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается достаточным объемом и корректностью выполненных лабораторных и экспериментальных исследований, применением современных методов математического моделирования на основе численных методов и сопоставлением полученных результатов с натурными данными, а также с результатами полученными другими авторами.

Личный вклад автора – анализ отечественного и зарубежного научного опыта по теме исследования, участие в выполнении лабораторных и экспериментальных исследований, выполнение численного моделирования, обобщение и анализ полученных данных, представление результатов исследования в качестве статей и докладов на научных конференциях российского и международного уровня.

Материалы, положенные в основу диссертации, обработаны и интерпретированы автором лично.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах, международных форумах и конференциях: 59-я студенческая научная конференция

по горному делу в Краковской Горно-Металлургической академии, 6 декабря 2018 г., Краков, Польша; Международная научная конференция «FarEastCon». Дальневосточный федеральный университет 2018 г., 2020 г., Владивосток; 70-й студенческий форум Фрайбергской горной академии, 6 июня 2019 г., Фрайберг, Германия; Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: IX Всероссийская научно-практическая конференция. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 10-12 апреля 2019 г., Якутск; 8-я Международная конференция по математическому моделированию в естественных науках, 26-29 августа 2019 г., Братислава, Словакия; 12-й Российско-Германский сырьевой форум, 27 ноября 2019 г., Горный университет, Санкт-Петербург; Международный научный симпозиум «Неделя горняка», 2020 г., 2021 г., МИСиС, Москва; 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020», 14-18 сентября 2020 г., Пермь; Международная научно-техническая конференция «Науки о Земле и окружающей среде», 25-26 января 2021 г., Владивосток; 10-я Международная конференция по математическому моделированию в естественных науках «IC-MSQUARE 2021», 6-9 сентября 2021 г., Греция; Международная научно-практическая конференция «Development of Science in the XXI Century», 25-26 апреля 2024 г., г. Дортмунд, Германия; Международная научно-практическая конференция «Science and Technologies», 29 апреля 2024 г., г. Петрозаводск.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 2 статьи – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК), 2 статьи – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение и заключение, список литературы из 153 наименований, 90 рисунков, 23 таблицы и 3 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю к.г.-м.н. Поспехову Г.Б., к.г.н. Поморцеву О.А., д.т.н. Карасеву М.А., к.т.н. Маринину М.А., а также коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета за содействие и помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, идея и задачи диссертационной работы, сформулированы теоретическая и практическая значимость, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе в рамках анализа изученности проблем инженерно-геологического обеспечения устойчивости штабелей кучного выщелачивания выполнен обзор отечественного и зарубежного опыта и перспектив использования технологии кучного выщелачивания золота, проанализированы инженерно-геологические и другие факторы, определяющие условия формирования и эксплуатации техногенных массивов на участках кучного выщелачивания. Обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнена характеристика золоторудных месторождений Куранахского рудного поля, представлены результаты анализа инженерно-геологических условий формирования и эксплуатации объекта исследования, описаны этапы технологического процесса кучного выщелачивания золота. Произведено обоснование подхода к прогнозу техногенного гидродинамического режима и к оценке устойчивости штабеля кучного выщелачивания на основе современных моделей

В третьей главе представлены результаты исследований гранулометрического состава, фильтрационных свойств и физико-механических характеристик окомкованных песчано-глинистых руд с помощью лабораторных методов, стендовых укрупненно-лабораторных испытаний, а также методом опытно-фильтрационных испытаний на объекте исследования.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования для прогноза техногенного гидродинамического режима и развития напряженно-деформированного состояния штабе-

лей кучного выщелачивания. Разработаны рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости при формировании и эксплуатации массивов штабелей кучного выщелачивания с учетом мониторинга их состояния и свойств.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы и рекомендации.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве научных защищаемых положений.

1. Песчано-глинистые окомкованные руды являются специфическими техногенными грунтами, характеризующимися значительным снижением прочности окатышей до практически нулевых значений и резким уменьшением коэффициента фильтрации при полном водонасыщении вследствие взаимодействия с технологическими растворами, что необходимо учитывать при прогнозе устойчивости многоярусных штабелей на участках кучного выщелачивания золота.

В качестве объекта исследования рассматривается техногенный массив штабеля окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа, расположенный в Республике Саха (Якутия), на территории золотоносного Алданского района. Куранахский золоторудный геолого-промышленный тип оруденения сформировался в корях выветривания по первичным эпитермальным рудам золотосульфидно-карстового типа. Песчано-глинистые руды характеризуются низким содержанием золота – 0,7 г/т и кварц-лимонитгидрослюдистомонтмориллонитовым составом с включением крупнообломочного материала. Это обуславливает значительную неоднородность по составу и низкую фильтрационную способность исходного сырья, что требует предварительного окомкования материала. В связи с этим, технологическая схема кучного выщелачивания золота (рисунок 1), включает в себя дробление, окомкование, укладку руды в штабель с помощью стакеров и последующее орошение растворами цианида.

Формирование штабеля кучного выщелачивания производится поярусно, высота каждого яруса 10 м, общая высота сооружений 40 м, генеральный угол откоса сооружения 33°. Укладка и орошение руды осуществляется в период положительных температур.

Штабель формируется из окомкованной руды класса -125 мм ($d_{50} \sim 10$ мм). Для сбора продуктивных растворов в основании штабеля располагается дренажный слой мощностью 1 м, подстилаемый слоем песка 0,3 м и геомембраной, уложенной на уплотненный слой суглинистого грунта в основании сооружения. При наращивании высоты штабеля производится уплотнение его поверхности и укладка дренажного слоя. Следующий ярус штабеля формируется после выведения из орошения предыдущего.



Рисунок 1 – Схема конструкции штабеля с технологическими процессами кучного выщелачивания золота

Результаты определения гранулометрического состава окомкованных руд представлены в виде интегральных кривых на рисунке 2. По аналогии с природными грунтами руды могут быть отнесены к крупнообломочным грунтам с высокой степенью неоднородности. Отличия в распределении частиц по размеру для руд до и после орошения объясняются тем, что после укладки и просачивания растворов происходит разрушение части окатышей и обломков породы под действием растворов и давления вышележащих руд.

Для подтверждения возможности разрушения частиц окатышей и включений карбонатных пород в массиве рудного штабеля были выполнены определения прочности гранул для классов -10 +1 мм, составляющих основной диапазон окомкованного рудного материала, и прочности на растяжение включений для классов -125 +1 мм с помощью испытания на разрушение образцов произвольной формы посредством сферических инденторов. По результатам испытаний на раздавливание для классов -10+1 мм прочность окаты-

шей составила для свежееокомкованной руды от 60 до 199 кПа, а для выведенной из орошения руды от 32 до 92 кПа. При определении прочности на растяжение включений для каждого испытываемого класса в случайном порядке отбиралось не менее 20 образцов, в общей сложности было выполнено порядка 180 испытаний для каждой из видов руд: свежееокомкованной и выведенной из орошения. Минимальные значения прочности на растяжение для обломков карбонатных пород представлены на рисунке 3. Таким образом, установлено снижение прочности окатышей и включений в руде до 50% после выведения штабеля из орошения.

Для оценки устойчивости структуры рудного материала при воздействии воды была проведена оценка скорости размокания окатышей класса -5 мм. В результате испытаний установлено, что при полном погружении под воду рудный материал практически полностью размокал в течение двух часов, что говорит о снижении прочности окатышей до практически нулевых значений. Для оценки влияния изменения размеров частиц после орошения на фильтрационные свойства были выполнены лабораторные определения коэффициента фильтрации класса -5 мм. Испытания в фильтрационном приборе и в трубке Г.Н. Каменского показали, что в обоих случаях для класса – 5 мм свежееокомкованная руда имеет коэффициент фильтрации в диапазоне от 11 до 0,25 м/сут, который в районе 500-1000 секунд приближается к значениям коэффициента фильтрации, выведенной из орошения руды, составляющий менее 0,5 м/сут.

Таким образом, установленная специфика изменения состава и свойств окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа должна учитываться при прогнозе устойчивости многоярусных штабелей на участках кучного выщелачивания золота и оценке их строения в процессе эксплуатации.

2. Фильтрационная неоднородность техногенного массива в штабелях кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа определяется сегрегацией рудного материала при его отсыпке и последующими изменениями структуры массива в процессе орошения технологическими растворами.

Анализ результатов маркшейдерских наблюдений позволил установить, что при начальной высоте первого яруса 10 м, оседание

поверхности штабеля варьировалось от 0,6 м до 3,8 м, основное уплотнение штабеля происходило после его орошения (рисунок 4). Лабораторные испытания также подтвердили, что проливка приводит к осадке рудного материала на величину около 7%. При этом установлено, что деформационные процессы происходят с различной интенсивностью в зависимости от гранулометрического состава материала и гидродинамического режима эксплуатации штабеля.

Данные условий формирования штабеля при отсыпке окомкованной руды стакером указывают на неоднородность строения техногенного массива за счет сегрегации рудного материала. Поэтому при анализе причин зафиксированных деформаций с целью оценки влияния структуры техногенного массива штабеля кучного выщелачивания на их значение были проведены полевые фильтрационные испытания по методу В.М. Насберга в 4 скважинах (рисунок 5). Анализ результатов выполнения поинтервальных наливов в четырех скважинах позволил определить, что величина коэффициента фильтрации по глубине изменялась в широком диапазоне (рисунок 6). В основном значения изменяются от 2 до 10 м/сут, но на отдельных локальных участках значение коэффициента фильтрации падало до 0,01-0,001 м/сут, а на других достигало значения до 100 м/сут, что свидетельствует о неравномерном распределении рудного материала в штабеле.

Влияние процесса сегрегации на состав техногенного массива при отсыпке штабеля приводит к формированию непроницаемых линз наподобие песчано-глинистых пород внутри штабеля после орошения, что может сказываться на эффективности выщелачивания и развитии неравномерных деформаций. Во время отсыпки штабеля происходит концентрация рудной мелочи в центре массива, а более крупных кусков – на нижних склонах и в основании. На рисунке 7 представлены доказательства неоднородности строения штабеля.

Таким образом, установлено, что процесс сегрегации материала приводит к формированию неоднородного строения рудного штабеля с зонами, резко отличающимися по гранулометрическому составу, что непосредственно влияет на анизотропию массива по коэффициенту фильтрации. В результате этого формируются участки, сложенные самыми мелкими фракциями, которые подвергаются размоканию растворами и в процессе уплотнения образуются зоны с коэффициентом

фильтрации, характерным для глинистых пород. Такие слабопроницаемые участки влияют на движение растворов в штабеле и на снижение эффективности извлечения золота, а также сказываются на степени водонасыщения штабеля растворами свыше допустимых показателей, что представляет угрозу для эффективного и безопасного функционирования сооружения. В связи с этим большое значение приобретает прогноз техногенного гидродинамического режима на участках кучного выщелачивания с целью обоснования оптимальной интенсивности орошения окомкованных песчано-глинистых руд.

3. Прогноз техногенного гидродинамического режима при обосновании оптимальной интенсивности орошения окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания должен осуществляться на основе моделей ненасыщенной фильтрации с учетом калибровки их параметров с помощью укрупненно-лабораторных испытаний.

При выщелачивании необходимым является контакт золото-содержащей руды с кислородом, участвующим в реакции. Исследованиями Scott Eifen и Denys Parra, а также Meschac-Bill Kime установлено, что предельная степень водонасыщения руды штабеля должна быть принята равной 0,8 д.е. Таким образом, в процессе эксплуатации штабель кучного выщелачивания должен быть сложен не полностью водонасыщенной рудой, являющейся зоной аэрации. Математическое моделирование распределения влаги часто использует уравнение Ричардса, которое описывает течение жидкости в ненасыщенной пористой среде (1):

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} + S(\psi) s_{stor} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \nabla K(\psi) \nabla (\psi + z) = Q \quad (1)$$

При выполнении фильтрационных расчетов, для зависимости $\theta(\psi)$ используется модель Ван Генухтена, которая позволяет описать процесс фильтрации жидкости через пористые тела в полностью или неполностью водонасыщенном состоянии (2):

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m}, & \text{при } \psi < 0; \\ \theta_s, & \text{при } \psi \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

а для коэффициента фильтрации – модель Муалема (3):

$$K(\psi) = K_s K_r(\psi) = K_s S_e^{0,5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2. \quad (3)$$

В уравнениях (1-3) приняты следующие обозначения: Θ – объемное влагосодержание; Ψ – высота всасывания, связанная с приведенным напором h соотношением (4):

$$h = \psi + z, \quad (4)$$

S_{stor} – коэффициент упругости; K – коэффициент влагопереноса; θ_s, θ_r – остаточное (то есть неизвлекаемое гравитационным путем) влагосодержание и влагосодержание при полном насыщении; S, S_e – насыщенность и эффективная насыщенность, соответственно, определяемые по формулам (5):

$$S = \frac{\theta}{\theta_s}; \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}; \quad (5)$$

n – эмпирический параметр модели, отражающий характеристики пор; m выражается через n по формуле $m = 1 - 1/n$; α – параметр модели, функция размера пор; K_s – коэффициент фильтрации в условиях насыщения; $K_r(\Psi)$ – относительная проницаемость; Q – удельные объемные источники и стоки. Здесь и далее предполагается, что влагосодержание при полном насыщении θ_s равно пористости и плотность жидкости постоянна.

Параметры модели Ван Генухтен – Муалема для окомкованной руды определялись по данным лабораторных испытаний, которые включали определение гранулометрического состава и определение коэффициента фильтрации в полностью водонасыщенном состоянии. Параметры подстилающих окомкованную руду щебенистого и песчаного слоев принимались по справочным данным. Параметры фильтрационной модели сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры модели Ван Генухтена – Муалема для пород штабеля

Наименование материала	K_s , м/сут.	θ_r	θ_s	α , 1/м	n	m
Окомкованная руда	2,35	0,139	1,0	12,4	2,28	-0,56
Дренажный слой	7,0	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62
Песок	3.5	0.105	1.0	14.5	2.68	-0.62

Калибровка численной модели выполнялась по результатам укрупненно-лабораторных испытаний, полученных на стендовом

оборудовании (рисунок 8). Данные испытания потребовались для получения фактической скорости водонасыщения окомкованных руд штабеля классом -125 мм. При построении фильтрационной численной модели учтены основные этапы эксперимента, включая первоначальное водонасыщение окомкованной руды, а также последующие стадии фильтрации жидкости через пористое пространство.

Численная модель геометрически повторяла физическую модель: мощность слоя окомкованной руды 0,7 м; мощность дренажного слоя 0,3 м; размеры стенда 450×450×1000 мм (рисунок 9). При выполнении калибровки модели принято, что интенсивность орошения составляет 300 л/м²сут. Расчеты показали, что насыщение окомкованной руды происходит за 17 ч, что соответствует данным, полученным в рамках физического моделирования. После насыщения время фильтрации жидкости через пористую среду составляет 20 мин, что было отмечено в эксперименте. Влажность окомкованной руды достигает 0,32 д.ед., что соответствует показателю водонасыщения 76%.

На основании выполненных расчетов для принятых фильтрационных параметров окомкованных руд получены закономерности изменения максимальной степени водонасыщения пород штабеля от коэффициента фильтрации (рисунок 10, а) и интенсивности орошения (рисунок 10, б). Результаты показывают, что по мере увеличения коэффициента фильтрации наблюдается снижение степени водонасыщения пород штабеля, что позволяет увеличивать интенсивность орошения поверхности штабеля растворами. При коэффициенте фильтрации 5 м/сут интенсивность орошения может быть увеличена до 500 л/м²сут, при 4 м/сут – до 400 л/м²сут, при 2 м/сут – не должна превышать 300 л/м²сут.

Для всех рассматриваемых параметров интенсивности орошения проанализирована способность дренажного слоя отводить растворы из-под штабеля при нормальном режиме эксплуатации (рисунок 11). Согласно полученным результатам, зона полного водонасыщения не поднимается выше дренажного слоя при принятых параметрах интенсивности орошения.

Учет возможной вариативности фильтрационных характеристик в зависимости от фактического гранулометрического состава

окомкованной руды показал, что значение предельных величин интенсивности орошения изменяется в пределах 20%. Можно отметить, что в случае, если фактическая картина распределения фильтрационных характеристик пород штабеля будет более благоприятная по отношению к данным, получаемым на основании лабораторных исследований, это позволяет потенциально повысить интенсивность орошения пород растворами. Поэтому рекомендуется проводить опытно-фильтрационные исследования на участках штабеля после завершения его орошения.

Таким образом, предложенный метод прогноза техногенного гидродинамического режима в штабеле кучного выщелачивания, основанный на определении фильтрационных показателей среды по данным укрупненно-лабораторных исследований на стендовом оборудовании на базе модели ненасыщенной фильтрации позволяет определить допустимую интенсивность орошения, оценить пропускную способность дренажной системы, а также обосновать положение уровня растворов в массиве для прогноза устойчивости штабеля кучного выщелачивания.

Оценка устойчивости штабеля выполнена по результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива с учетом стадийности формирования ярусов, нагрузки от горнотранспортного оборудования и обводненности растворами (рисунки 12-14). В основе расчетной схемы для описания механического поведения грунтов основания принята модель Кулона-Мора, для руды штабеля – модель упрочняющегося грунта. Расчеты устойчивости показали, что на стадии строительства и эксплуатации штабель сохраняет устойчивость при всех вариантах нагружения. Коэффициент запаса устойчивости составляет от 1,26 до 2,16 и соответствует нормативным требованиям – не менее 1,20. Нарушение устойчивости возникает только при полном водонасыщении штабеля (таблица 2), что недопустимо с точки зрения технологических требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача повышения устойчивости техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота

при их формировании и промышленной эксплуатации. Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Предложен подход к прогнозу техногенного гидродинамического режима в штабеле кучного выщелачивания на основе моделей ненасыщенной фильтрации Van Genuchten – Mualem и результатов укрупненно-лабораторных исследований песчано-глинистых окомкованных золотосодержащих руд.

2. Определены оптимальные параметры интенсивности орошения рудного штабеля растворами цианида для различных значений коэффициента фильтрации окомкованной руды в зависимости от степени ее водонасыщения при условии, что в процессе эксплуатации не достигается показатель предельного значения степени водонасыщения – 0,8 д. е.

3. Установлено, что гранулометрический состав и физико-механические свойства песчано-глинистых окомкованных руд куранахского типа изменяются в процессе формирования и эксплуатации штабеля кучного выщелачивания, при этом прочностные свойства, благодаря содержанию псефитовых частиц, существенно не ухудшаются.

4. Выявлены причины развития неравномерных деформаций оседаний поверхности рудного штабеля в процессе его орошения растворами цианида и увеличения высоты сооружения при формировании последующих ярусов. Оседания вызваны разрушением окатышей при увеличении их влажности и давления, а неравномерность деформаций обусловлена неоднородностью структуры массива за счет сегрегации рудного материала при его укладке в штабель.

5. Установлено, что процесс сегрегации рудного материала приводит к формированию зон, отличающихся по гранулометрическому составу, что обуславливает фильтрационную анизотропию массива. В результате этого формируются зоны, сложенные мелкими фракциями, которые при размокании образуют участки с коэффициентом фильтрации, характерным для глинистых пород.

6. Разработаны рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости штабелей кучного выщелачивания золота на основе выполнения комплексного мониторинга состояния техно-

генных массивов на всех этапах их формирования и эксплуатации, основанные на маркшейдерском, инженерно-геологическом, технологическом, гидрогеологическом и геомеханическом контроле сооружения.

7. Результаты работы могут быть использованы проектными и эксплуатирующими организациями при обосновании оптимальных параметров штабелей кучного выщелачивания золота и их инженерно-геологическом изучении в процессе эксплуатации, а также для организации мониторинга за их устойчивостью.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является разработка методов оценки структуры штабелей кучного выщелачивания в объеме всего техногенного массива в процессе отсыпки рудного материала и ее изменения после орошения и наращивании высоты сооружения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. **Поморцева, А.А.** Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля кучного выщелачивания золота. / Поморцева А.А., Поспехов Г.Б. // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 3. – С. 72-79. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

2. **Поморцева, А.А.** Инженерно-геологические факторы развития деформационных процессов массивов окомкованных песчано-глинистых руд кучного выщелачивания золота. / Поморцева А.А., Поспехов Г.Б. // Научно-технический вестник "Каротажник". 2024. – № 3 (329). – С. 154-162.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Marinin, M. A. Engineering and geological parameters for heap leaching of gold from low-grade sandy clay ores: a feasibility study / M. A. Marinin, M. A. Karasev, G. B. Pospekhov, A. A. Pomortseva, V. I. Sushkova // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – № 9. – P. 22-37. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-9-0-22.

4. Маринин, М. А., Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов

фильтрации в штабеле кучного выщелачивания/ М. А. Маринин, М. А. Карасев, Г.Б. Поспехов, А.А. Поморцева, В.Н. Кондакова, В.И. Сушкова // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. – 30-40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Поморцева, А.А.** Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости штабеля кучного выщелачивания. / Поморцева А.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б. // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 1. – С. 63-69. DOI: 10.17513/use.37566.

6. Васильев, М.Д. Математическое моделирование и прогнозирование состояний экосистем: Учебное пособие. / Васильев М.Д., Иванов Г.И., Матвеева О.И., Поморцев О.А., **Поморцева А.А.**, Трофимцев Ю.И. / Под ред. Трофимцева Ю.И. –Якутск, ООО «Компания Дани-Алмас», 2020. –138 с.

Патент:

7. Патент № 2779166, Российская Федерация, МПК В03В 13/00, E02D 1/00. Устройство для определения характеристик песчано-глинистых окомкованных руд: № 2022105698 заявл. 03.03.2022: опубл. 05.09.2022 / Маринин М.А., Поспехов Г.Б., **Поморцева А.А.**, Сушкова В.Н., заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – 12 с. : ил.

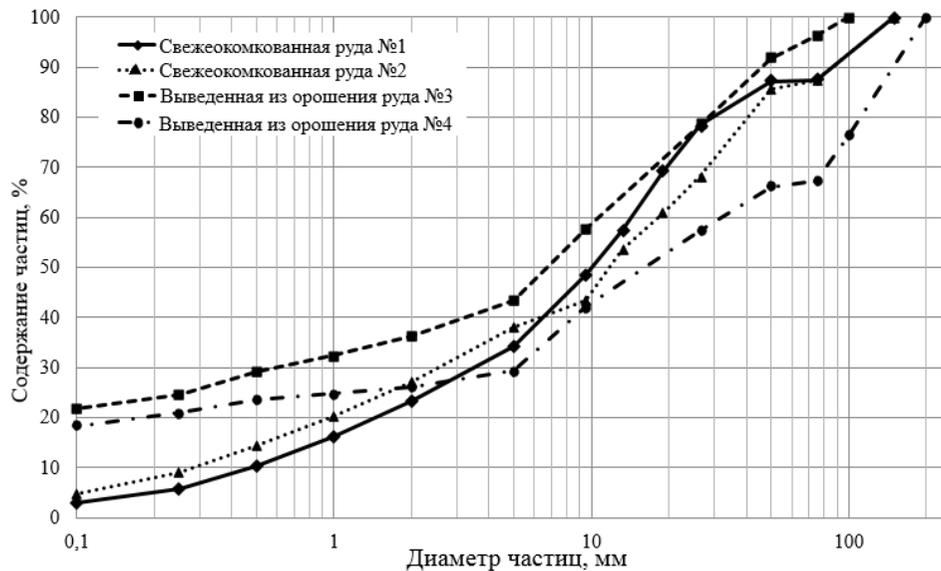


Рисунок 2 – Интегральные кривые гранулометрического состава руды

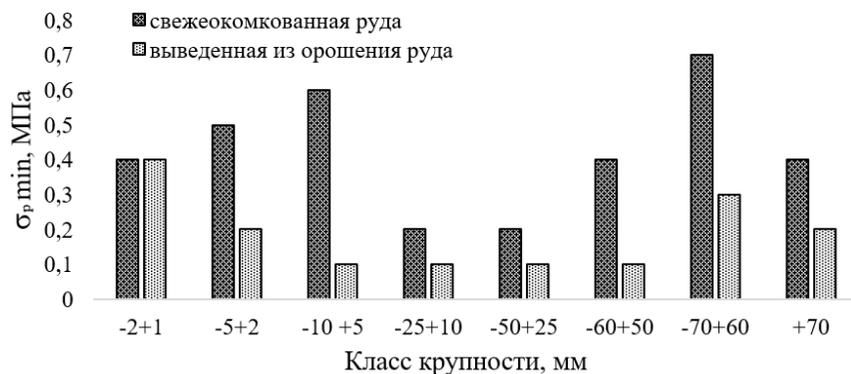


Рисунок 3 – Минимальные значения прочности на растяжение для обломков карбонатных пород

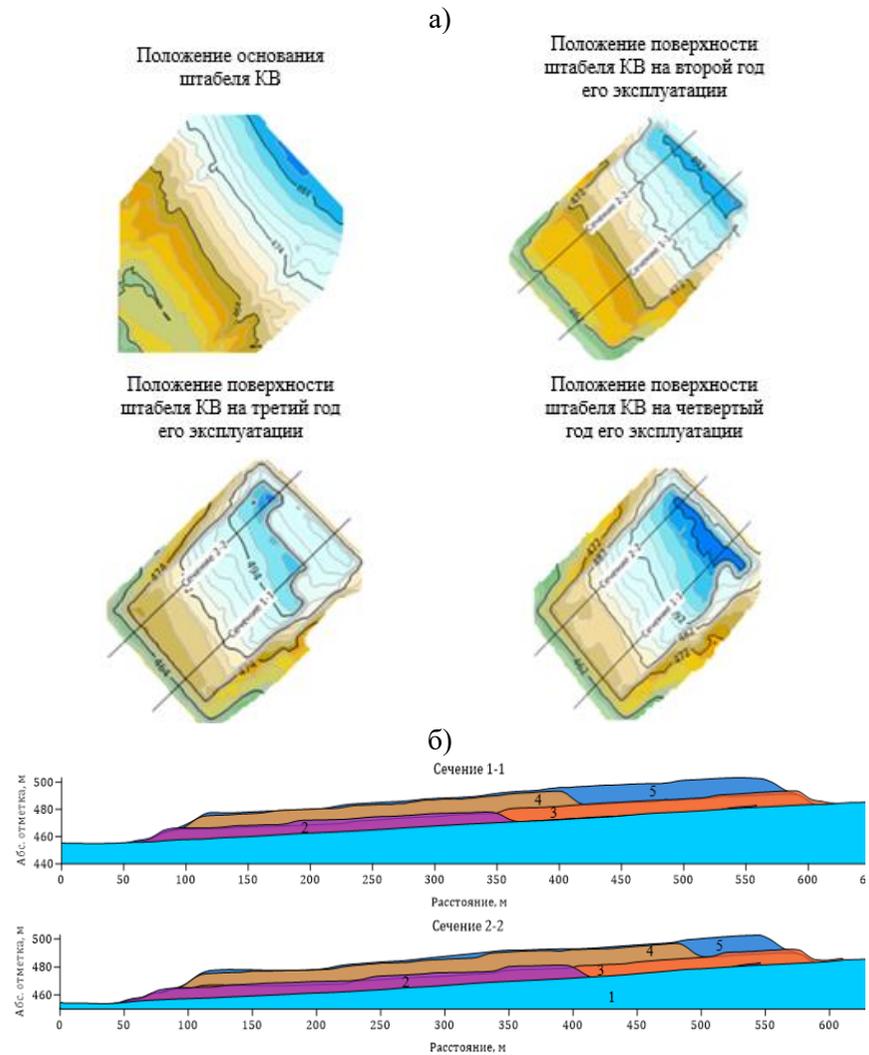


Рисунок 4 – Положения основания и поверхности штабеля кучного выщелачивания а): Профили штабеля кучного выщелачивания на различных этапах его формирования б): 1 – поверхность основания штабеля; 2– конфигурация штабеля в первый год; 3– конфигурация штабеля во второй год; 4 – конфигурация штабеля на в третий год; 5 – конфигурация штабеля в четвертый год

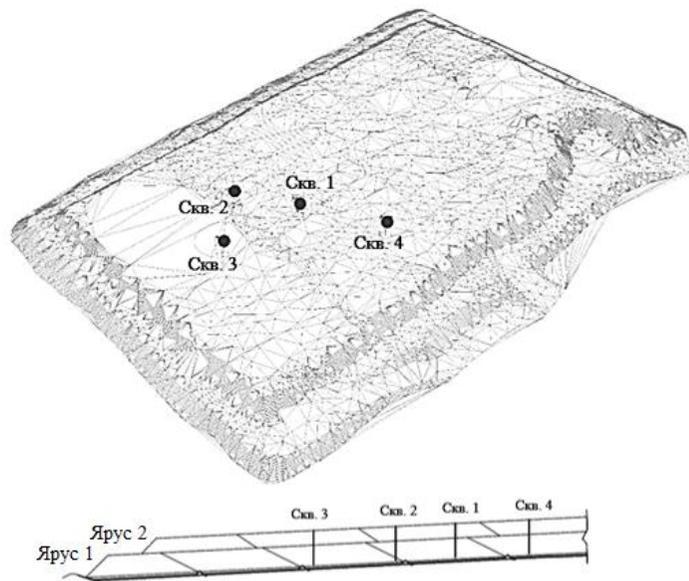


Рисунок 5 – Схема расположения гидрогеологических скважин при выполнении фильтрационных испытаний по методу Насберга

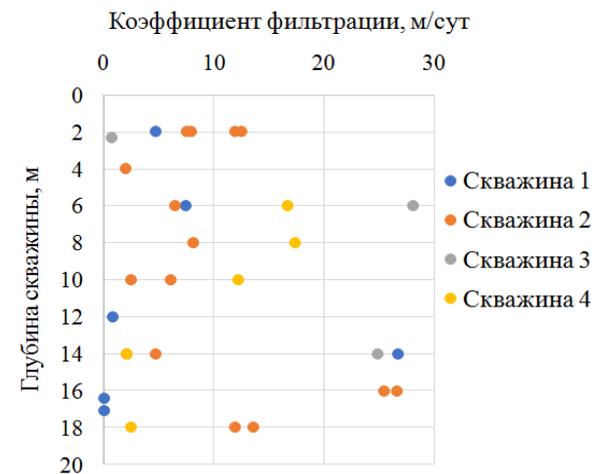


Рисунок 6 – Результаты выполнения наливов по методу Насберга на участке кучного выщелачивания золота.

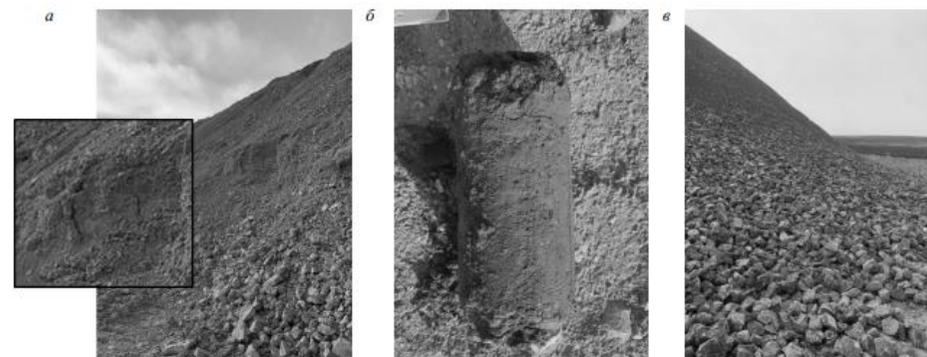


Рисунок 7 – Сегрегация рудного материала в штабеле на участке кучного выщелачивания: а) верхняя часть откоса; б) керн из выведенного из орошения штабеля; в) нижняя часть откоса

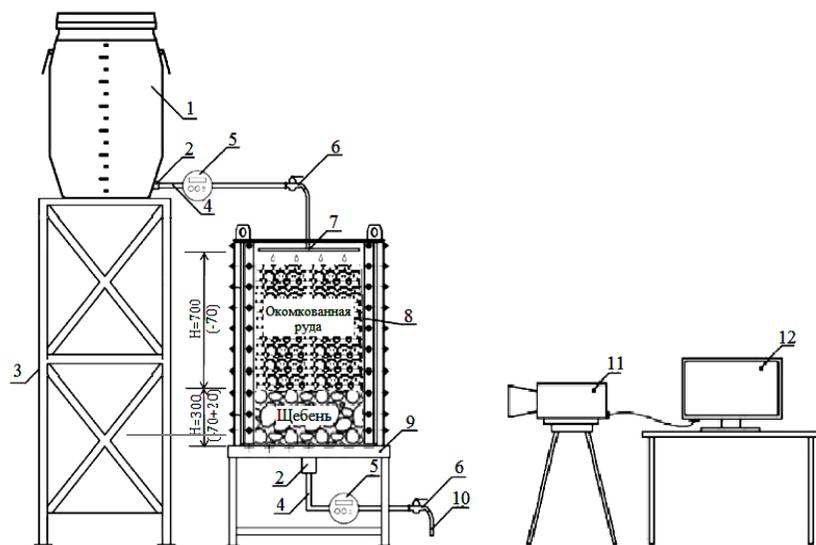


Рисунок 8 – Схема проведения крупненно-лабораторных испытаний, где 1 – емкость с водой; 2 – переходник; 3 – подставка под емкость; 4 – сливная труба; 5 – счетчик воды; 6 – кран; 7 – система капельного орошения; 8 – рабочая камера; 9 – подставка; 10 – отводная труба; 11 – видекамера; 12 – персональный компьютер

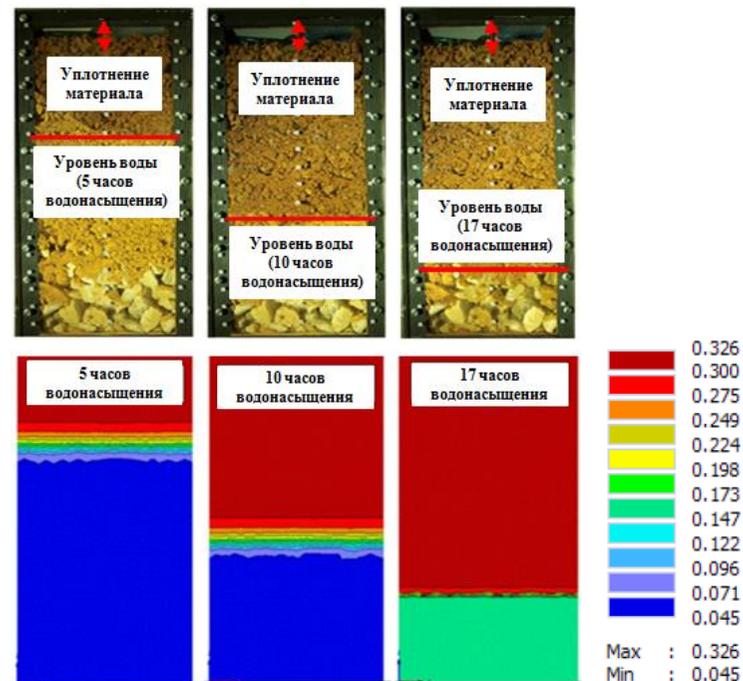


Рисунок 9 – Калибровка численной модели по результатам проведения крупненно-лабораторных испытаний рудного материала

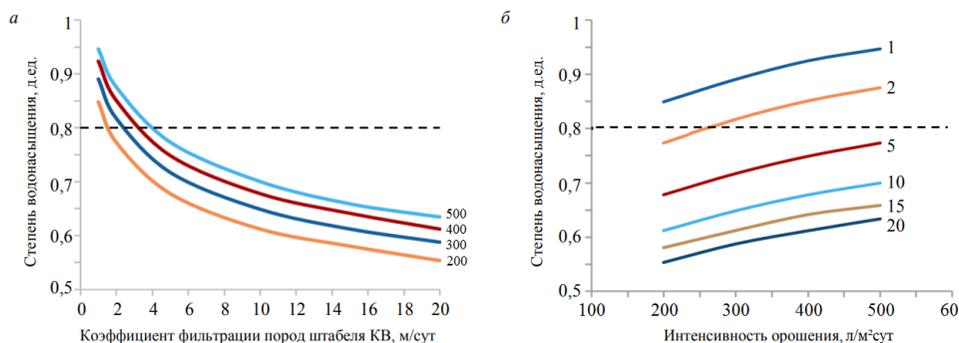


Рисунок 10 – Результаты оценки закономерности изменения степени водонасыщения штабеля участка КВ в зависимости от коэффициента фильтрации (а) и интенсивности орошения (б) при заданной величине интенсивности орошения (200, 300, 400, 500 л/м²сут) и коэффициенте фильтрации пород (1, 2, 5, 10, 15, 20 м/сут)

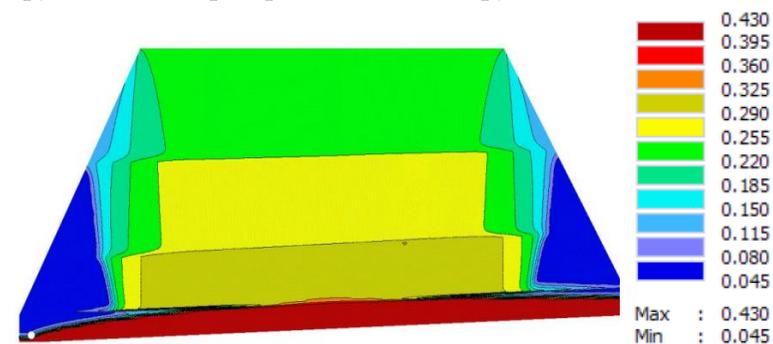


Рисунок 11 – Результаты фильтрационного численного моделирования изменения влажности рудного материала и степени обводнения дренажного слоя массива штабеля кучного выщелачивания

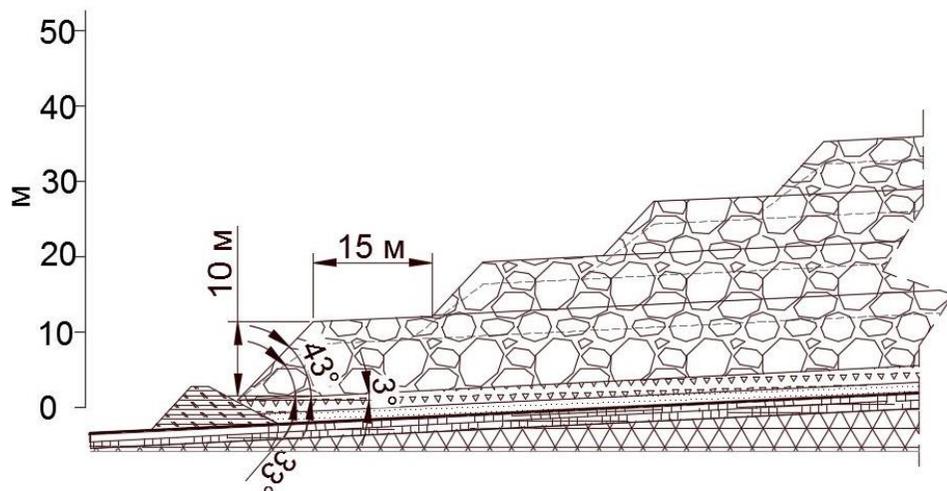


Рисунок 12 – Конструкция откоса штабеля в поперечном сечении

Таблица 2 – Результаты оценки общей устойчивости откоса штабеля

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при различных схемах нагружения			
	Стадия строительства	Стадия эксплуатации, режим нормальной эксплуатации	Стадия эксплуатации, полное водонасыщение первого яруса	Стадия эксплуатации, полное водонасыщение всех ярусов
Поперечное сечение - I	1,83	1,61	1,36	0,76
Продольное сечение - II	1,94	1,71	1,52	0,91

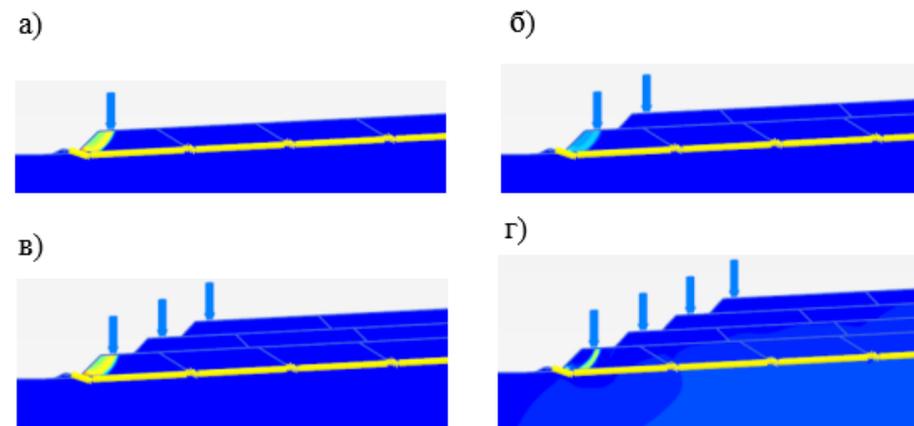


Рисунок 13 – Визуализация результатов численного моделирования штабеля кучного выщелачивания: поперечное сечение, с учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования, стадия эксплуатации, режим нормальной эксплуатации: а) для 1 яруса; б) для 2 ярусов; в) для 3 ярусов; г) для 4 ярусов

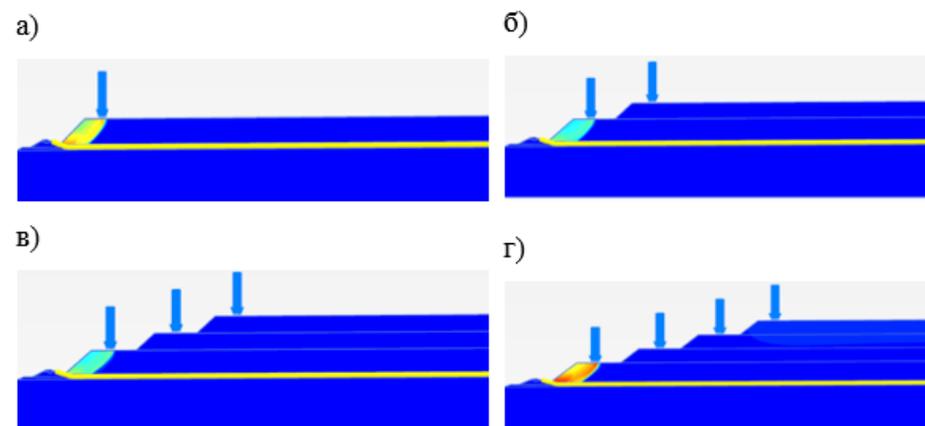


Рисунок 14 – Визуализация результатов численного моделирования штабеля кучного выщелачивания: продольное сечение, с учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования, стадия эксплуатации, режим нормальной эксплуатации: а) для 1 яруса; б) для 2 ярусов; в) для 3 ярусов; г) для 4 ярусов