

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Целищев' (Tselishchev), written in a cursive style.

Целищев Николай Анатольевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ В ПРОЦЕССЕ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.6 – Гидрогеология

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель: **Котлов Сергей Николаевич**
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
горный университет».

Официальные оппоненты: **Кирюхин Алексей Владимирович**
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник. Институт
вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения Российской
академии наук (ИВиС ДВО РАН).

Рыбникова Людмила Сергеевна
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник. Институт
горного дела Уральского отделения
Российской академии наук (ИГД УрО
РАН).

Защита состоится 28.05.2025 в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.25 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5 (корпус 20, ауд. 504).



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан 04.04.2025

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.25
Доктор геолого-минералогических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'O.E. Lepokurova'.

Лепокурова О.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Яковлевское месторождение является крупнейшим в России по запасам богатых железных руд (9,5 млрд т.). Его уникальность обусловлена не только промышленным потенциалом, но и сложностью горно-геологических условий разработки. Согласно проектным решениям, выемка богатых руд производится на глубинах более 600 м под водоносным горизонтом с напором 300 м, отделённым от выработок водозащитным целиком.

К настоящему времени не создана единая теоретическая модель деформирования водонасыщенного массива дисперсных пород, позволяющая прогнозировать изменение водопритока в процессе его сдвижения, что обуславливает актуальность получения эмпирических зависимостей для прогнозирования водопритоков в подобных Яковлевскому месторождению условиях.

Рост водопритоков в горные выработки рудника за последние 18 лет при сохранении контура ведения горных работ подчеркивает необходимость установления закономерностей изменения схемы формирования водопритока в процессе подработки и, как следствие, увеличения проницаемости водозащитной толщи, разработки положений гидрогеологического мониторинга для повышения безопасности отработки Яковлевского месторождения. Недостаточная надежность прогнозов водопритоков в Яковлевский рудник приводит к затоплению почв горных выработок, нарушению планов ведения горных работ и активизации горно-геологических процессов.

Степень разработанности темы. В период до начала промышленной добычи руды исследованию гидрогеологических и инженерно-геологических условий Яковлевского месторождения посвящены работы Чайкина С.И., Саара А.А., Цибизова А.Н., Бабушкина С.П., Семенова П.В., Гуркина А.Я., Русиновича И.А., Иванов И.П. и др.

Методическими разработками, направленными на обоснование безопасных условий подработки водных объектов, выявление критериев наступления аварийных случаев прорывов подземных вод в горные выработки занимались такие ученые как Фисенко Г.Л., Гвирицман Б.Я., Шокин Ю.П., Кацнельсон Н.Н., Мироненко В.А., Шестаков В.М., Норватов Ю.А., Хохлов И.В., Борисов А.А., Бошенятов Е.В. и др. Как правило, эти работы фокусировались на горных массивах с

возможностью образования сети водопроводящих трещин, от высоты распространения которой и зависят условия безопасной подработки.

В трудах Дашко Р.Э., Трушко В.Л., Протосени А.Г. и их учеников уделяется внимание вопросам систематизации и районирования горно-геологических процессов, протекающих в богатых железных рудах водозащитной толщи, причинам их активизации, обосновываются условия реализации самого опасного из них – прорыва подземных вод в горные выработки, доказываемся факт наличия перетекания из перекрывающего водоносного горизонта, разрабатываются критерии устойчивости горных выработок, обосновываются характеристики крепи для безопасной отработки месторождения.

Однако, недоизученными остаются вопросы закономерностей изменения фильтрационных свойств дисперсных пород при их подработке и, как следствие, разуплотнения, что играет определяющую роль в формировании водопритока к очистным горным выработкам. Вместе с тем, на Яковлевском руднике не реализован потенциал в совершенствовании системы гидрогеологического мониторинга для повышения его чувствительности и оперативности к нисходящему перетеканию подземных вод.

Объект исследования – природно-техногенная гидрогеологическая система: рудник – водозащитная толща –подрабатываемый водоносный горизонт.

Предмет исследования – процесс формирования притока подземных вод к области ведения очистных работ при изменении проницаемости водозащитной толщи на Яковлевском руднике.

Цель работы: установление закономерностей изменения проницаемости водозащитной толщи для повышения достоверности прогнозов водопритоков в Яковлевский рудник.

Задачи исследования:

- выявление факторов формирования водопритоков в рудник через водозащитную толщу с учётом горно-геологических особенностей ведения очистных работ;
- обоснование схемы формирования водопритока в рудник с количественной оценкой источников в общем балансе;
- разработка методики прогнозирования водопритока к очистным выработкам на основе эмпирических зависимостей;

- совершенствование гидрогеологического мониторинга для контроля за перетеканием подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта.

Научная новизна работы:

- установлен экспоненциальный рост водопритока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта на фоне снижения величины водопритока из руднокристаллического горизонта по линейному закону при отработке Яковлевского месторождения;
- выявлена зависимость коэффициента фильтрации и фильтрационного сопротивления пород водозащитной толщи от их оседания на первоочередном участке и разработан алгоритм её получения для прилегающих участков;
- получены зависимости водопритока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта к очистному пространству от горных, геомеханических и гидрогеологических факторов.

Практическая значимость работы:

- выполнена адаптация объемно-весового метода смешения растворов для оценки баланса водопритоков в Яковлевский рудник во времени с целью повышения достоверности их прогнозирования, что может быть использовано при корректировке системы осушения месторождения и планов ведения горных работ;
- разработана методика прогнозирования водопритока к зоне ведения очистных работ и проницаемости пород водозащитной толщи на основе эмпирических зависимостей, что применимо для Яковлевского рудника и при строительстве и эксплуатации рудников в аналогичных условиях;
- составлены рекомендации по совершенствованию системы гидрогеологического мониторинга на Яковлевском месторождении для повышения чувствительности и скорости реагирования системы гидрогеологического мониторинга;
- разработаны дренажные мероприятия для снижения прорывоопасности при подработке водного объекта;
- обоснованы безопасные параметры скважин для проведения, предусмотренных проектом, пневмоиспытаний пород ВЗТ.

Методы исследования. При проведении исследований применялся комплексный подход к изучаемому объекту, который включает: сбор и систематизацию ранее проведенных научных работ, анализ данных мониторинга, полевые методы проведения гидрогеологической съемки и

отбор проб подземных вод на участках водопроявлений, а также камеральную обработку и интерпретацию собранных материалов с использованием современных компьютерных программ и статистических методов.

Достоверность научных положений и выводов обеспечивается значительным объемом сведений о режиме подземных вод, сходимостью полученных зависимостей с теоретическими предпосылками, статистической обработкой измерений, использованием поверенной аппаратуры и результатов анализов, выполненных в аккредитованных лабораториях.

Фактический материал и личный вклад автора.

Автором на основе литературных источников, ранее проведенных работ сотрудниками Горного университета в период 1998-2014 гг. сформулированы цель и задачи исследования. Проведена полевая гидрогеологическая съемка рудника: замеры минерализации подземных вод на участках водопроявлений в горных выработках (46 шт.), отбор проб подземных и рудничных вод (4 шт.) на ключевых участках водоотведения. Выполнена камеральная обработка и интерпретация данных гидрогеомеханического мониторинга (замеры абсолютных отметок реперов подземной и наземной наблюдательных станций в период с 2005 по 2022 гг., сведения о ежемесячных значениях водопритоков и уровней подземных вод в наблюдательных скважинах в период с 1986 по 2022 гг., сведения о химическом составе подземных и рудничных вод по совокупной базе данных из 240 проб в период с 1956 по 2022 гг.), полевой гидрогеологической съемки, построена численная геофильтрационная модель месторождения, проведены численные и аналитические расчеты, сформулированы выводы.

При проведении исследования автор также участвовал в выполнении научно-исследовательских работ: «Разработка совместной гидрогеологической и геомеханической модели отработки центрального участка Яковлевского месторождения в автоматизированном программном комплексе» (2021-2022 гг.), «Разработка технического регламента на создание системы специального гидрогеомеханического мониторинга на основе пневмоиспытаний проницаемости предохранительного целика» и «Гидрогеомеханическое сопровождение отработки богатых железных руд на Яковлевском руднике» (2020 и 2021 гг.)

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и получили положительную оценку на:

- IX Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», Донецк, 2023 г;
- XIII Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» Пенза, 2023 г.

Публикации. Результаты исследования освещены в 7 печатных работах, в том числе в 5 статьях – в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (Перечень ВАК, Scopus).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Изложение диссертации занимает 170 страниц, содержит 74 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 121 источника и два приложения.

Благодарности. Автор считает обязательным выразить искреннюю признательность своему научному руководителю к.г.-м.н., в.н.с. Котлову Сергею Николаевичу, сотрудникам НЦГ и ПГП лаборатории гидрогеологии и экологии Лесничему Л.И. и Гриценко К.И., а также всему коллективу кафедры гидрогеологии и инженерной геологии за точные замечания и советы при работе над диссертацией. Автор благодарит сотрудников предприятия ООО «Яковлевский ГОК» из отдела гидрогеомеханического мониторинга, геологов и гидрогеологов рудника за помощь при прохождении производственной стажировки и сборе материалов.

Краткая характеристика Яковлевского месторождения.

В административном отношении Яковлевское месторождение богатых железных руд располагается в 30 км северо-западнее г. Белгород у п. Яковлево.

В геологическом строении месторождения принимают участие докембрийские породы фундамента архей-протерозойского возраста и моноклинально залегающие на них со структурным несогласием образования фанерозойского осадочного чехла. Фундамент представлен железистыми кварцитами, метапесчаниками, филлитами и плагиогранитами. Осадочный чехол сложен терригенно-карбонатными отложениями нижнекаменноугольного, юрского, мелового, палеогенового и четвертичного возраста средней мощностью в пределах рудника 530 м. Отрабатываемые на месторождении богатые железные руды (БЖР) представляют собой зрелые продукты довизейских кор

выветривания (KR_1-C_1) линейно-трещинного типа, сложенные песками (реже песчаниками на карбонатном или хлоридном цементе) железнослюдково-мартитового (синьки) и мартит-гидрогематитового (краски) состава (рисунок 1). Мощность БЖР в пределах рудной полосы колеблется от 10 до 350 м. В прикровельной части руды несут следы гипергенных процессов карбонатизации и хлоритизации 5-100 м.

С точки зрения гидрогеологического районирования район работ приурочен к северо-восточной части Днепровско-Донецкого артезианского бассейна. В разрезе выделяются 9 водоносных горизонтов, относящихся к нижнему и верхнему водоносным комплексам, которые разделяются региональным водоупором байосс-батского возраста. В формировании водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника принимают участие нижнекаменноугольный (НВГ) и руднокристаллический (РВГ) водоносные горизонты нижнего комплекса. РВГ обладает низкими фильтрационными параметрами (K_f составляет 0,1-0,00001 м/сут), хлоридным натриевым составом с минерализацией в диапазоне 2-4 г/дм³, является сильно сдренированным в пределах горного отвода.

Известняки НВГ над очистными выработками и в северо-восточном направлении спорадически закарстованы и характеризуется K_f в диапазоне 1-5 м/сут. При этом в приподошвенной части НВГ на границе с РВГ присутствуют переотложенные руды, слои глин и углистых сланцев, коэффициент фильтрации которых составляет $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут. Воды НВГ характеризуются гидрокарбонатным натриевым составом с минерализацией 0,5 г/дм³.

Перечисленные особенности гидрогеологических условий предопределили ряд проектных решений, согласно которым дренаж осуществляется только узлами наклонных дренажных скважин непосредственно из горных выработок -425 гор., а выемка руды производится нисходящей слоевой системой от 0-го слоя (-370 гор.) с закладкой выработанного пространства и формированием искусственной потолочины. Очистные работы ведутся под защитой породного целика – водозащитной толщи (ВЗТ) мощностью 52-74 м., литологически отделяющей выработки 0-го слоя от подошвы НВГ. При этом НВГ с относительным напором более 300 м непосредственно не дренируется, а роль перетекания считается незначительной.

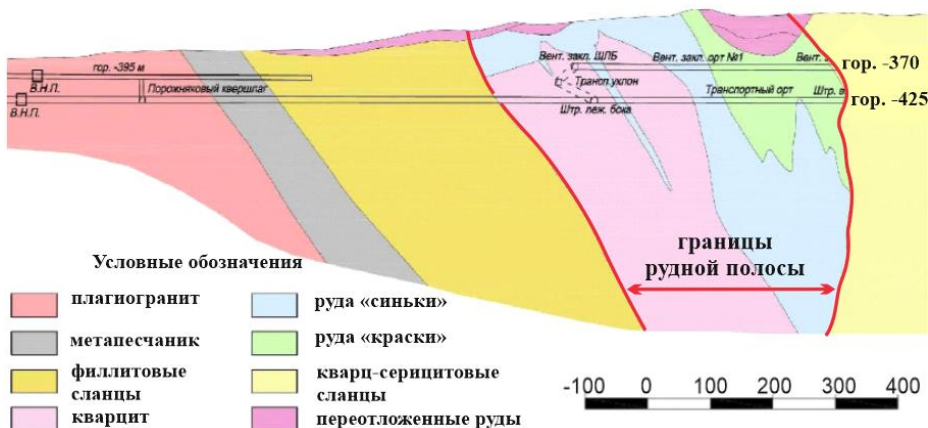


Рисунок 1 – Схематический разрез фундамента вкост рудной полосы

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Техногенное увеличение проницаемости пород водозащитной толщи в процессе эксплуатации Яковлевского рудника является основным фактором изменения схемы формирования водопритока к очистному пространству: в результате растет доля и абсолютная величина водопритока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта.

Водоприток к горным выработкам Яковлевского рудника формируется под влиянием как природных, так и техногенных факторов. Среди природных можно выделить: геологическое строение территории (структурные особенности); гидрогеологическая характеристика местности (условия на естественных гидродинамических границах, фильтрационные параметры горных пород и их неоднородность). К искусственным факторам относятся: фронт ведения горных работ (совокупная площадь и глубина сети горных выработок – дрен); степень техногенной нарушенности массива горных пород при его подработке, приводящая к увеличению их проницаемости.

Ввиду особенностей системы отработки месторождения с неизменным контуром дренирования влияние геометрии фронта ведения горных работ на водоприток незначительно. При сопоставлении водопритока в рудник и осадков за многолетний период было выявлено, что влиянием климата на водопритоки можно также пренебречь ввиду

наличия в разрезе двух региональных водоупоров и большой мощности перекрывающих осадочных отложений (530 м).

Таким образом, наибольшим влиянием обладают факторы, связанные с естественными геолого-гидрогеологическими особенностями территории и техногенной нарушенностью подрабатываемого массива. Первому фактору за более чем полувековую историю открытия, разведки и освоения месторождения уделялось гораздо больше внимания: детально изучены геологическое строение, фильтрационные параметры горных пород и особенности их пространственного распределения, что привело к принятию проектных решений, отраженных в разделе «Краткая характеристика Яковлевского месторождения». Однако такой подход основан на представлениях о неизменности проницаемости водозащитной толщи при её подработке и справедлив лишь на начальных этапах разработки месторождения или вне зоны техногенной нарушенности массива. Данное обстоятельство закономерно ставит вопрос об уточнении схемы формирования и оценке балансовых составляющих водопритока в процессе эксплуатации рудника.

Предпосылками к тезису о техногенном увеличении проницаемости водозащитной толщи служат натурные наблюдения в рамках мониторинга на месторождении, а также собранные автором в ходе гидрогеологической съемки рудника сведения о водопроявлениях в горных выработках Яковлевского рудника. При анализе оседаний подошвы водозащитного целика и дневной поверхности в период с 2008 по 2022 гг. было выявлено формирование зон разуплотнения в подрабатываемом вышележащем массиве горных пород, что приводит к увеличению размера пор и проницаемости ВЗТ (рисунок 2).

Результаты сопоставления дебитов дренажных скважин с оседаниями рудной потолочины во времени также демонстрируют рост проницаемости пород водозащитной толщи. Выявлено, что с оседанием вышележащего массива происходит рост дебита самоизлива дренажных скважин. Данный процесс наблюдается на фоне снижения уровня подземных вод в НВГ. Немаловажным доводом в пользу техногенного увеличения проницаемости подрабатываемого массива служит снижение общей минерализации и концентрации хлорид-иона в дренажных водах главного водосборника: с 2005 по 2022 гг. среднегодовая минерализация уменьшилась с $2,9 \text{ г/дм}^3$ до $1,5 \text{ г/дм}^3$, а среднегодовая концентрация хлорид иона с $1,67 \text{ г/дм}^3$ до $0,84 \text{ г/дм}^3$. Учитывая характерный

химический состав вод НВГ и РВГ, такие изменения в составе рудничных вод демонстрируют увеличение доли перетекания из НВГ через ВЗТ.



Рисунок 2 – Диаграмма распределения максимальных оседаний реперов наземной и подземной наблюдательных станций на 2008-2022 гг

В ходе гидрогеологической съемки рудника было зафиксировано более 40 участков водопроявлений в горные выработки, на которых производились замеры минерализации. План-схема точек опробования минерализации указывает на активную гидравлическую связь НВГ и РВГ над очистным пространством (рисунок 3). Сопоставление схемы с результатами ранее проведенных съемок свидетельствует об интенсификации перетекания подземных вод из НВГ.

Для количественной оценки условий формирования водопритока к горным выработкам применялся объемно-весовой метод, используемый при решении задач на смешение растворов. В качестве расчетных показателей были выбраны общая минерализация и концентрация хлорид иона, которые сильно контрастируют в водах НВГ и РВГ. Результаты промежуточных расчетных этапов верифицировались натурными измерениями в руднике в 2022 году. Сходимость значений составила 98%, что указывает на корректность выбранной расчетной схемы и дробления выработок на водобалансовые зоны.

Задача решалась и гидродинамическим методом с использованием построенной автором численной геофильтрационной модели района месторождения, откалиброванной по уровням подземных вод и водопритокам в рудник в нестационарной постановке на период с 2005 по 2022 гг. Особенностью модели является наличие над очистными выработками зоны с переменным во времени коэффициентом фильтрации, имитирующей техногенное увеличение проницаемости пород водозащитной толщи.

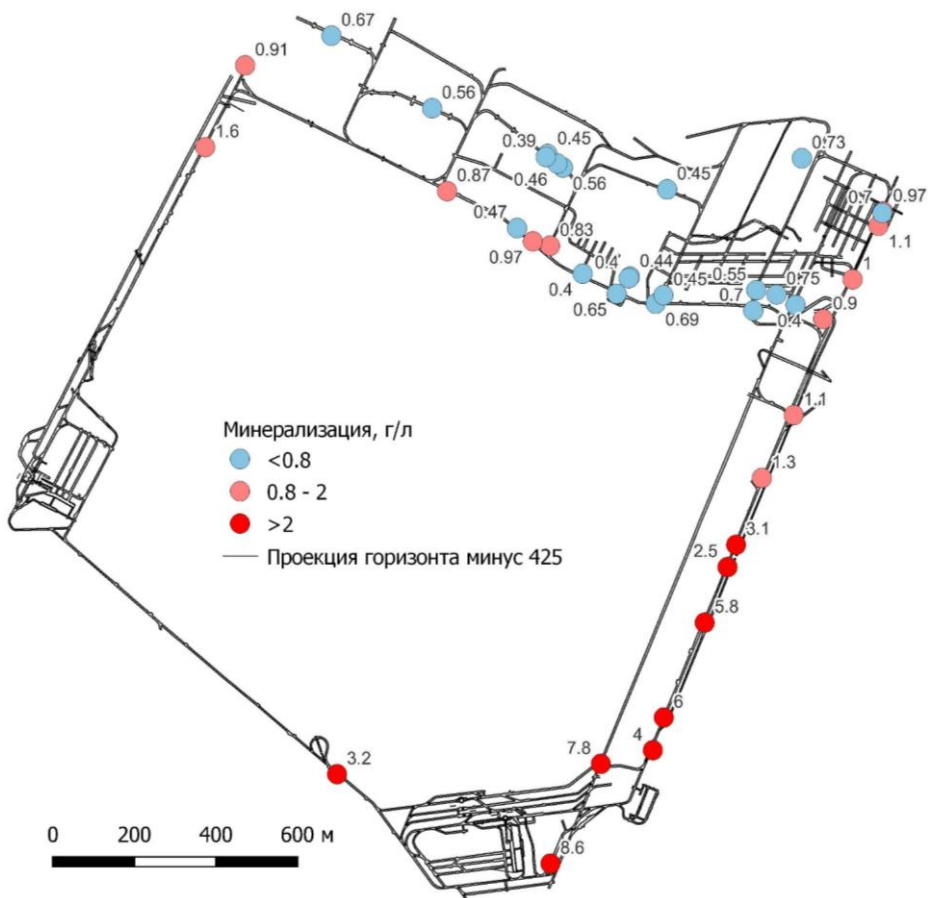


Рисунок 3 – Схема точек опробования на участках водопроявлений в руднике (по результатам гидрогеологической съемки автором в 2022 г.)

Хронологические изменения абсолютных величин и долей водопритока из НВГ и РВГ иллюстрируют изменчивость схемы формирования водопритока в процессе отработки месторождения. На начальном этапе эксплуатации рудника (2005 г.) водоприток из НВГ в среднем по оценке двумя методами составил 1200 м³/сут, к 2022 г. он возрос до 9100 м³/сут, что выражается в девятикратном росте за 18 лет (рисунок 4). Доля водопритока из НВГ к очистному пространству за

данный период также увеличилась по экспоненциальному закону с 23% до 87%.

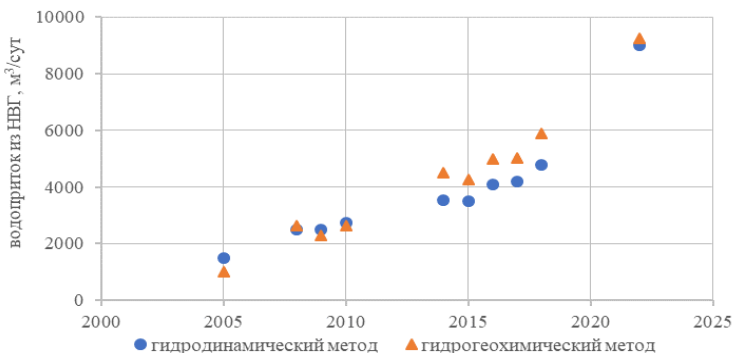


Рисунок 4 – Хронологический график изменения водопритока из НВГ к очистному пространству рудника по двум методам

Полученный результат указывает на необходимость подхода к водозащитной толще как к слою с переменной проницаемостью, которая определяется как её естественными фильтрационными параметрами (на начальном этапе подработки), так и степенью техногенной нарушенности (в процессе добычи полезного ископаемого). Очевидно, что что решения о системе дренирования рудника, положения по формированию горно-геологических процессов и гидрогеологическому мониторингу месторождения должны основываться на актуальных представлениях.

2. Выявленные эмпирические зависимости водопритока к области ведения очистных работ от горных, геомеханических и гидрогеологических факторов целесообразно использовать для его прогнозирования к первоочередному участку отработки БЖР, а полученную по предложенному алгоритму величину эквивалентного фильтрационного сопротивления – для оценки водопритока как на первоочередном, так и прилегающих участках месторождения.

При сохранении контура дренирования (ведения горных работ) и снижении уровней подземных вод в НВГ происходит экспоненциальный рост доли и абсолютной величины водопритока из НВГ вследствие техногенного увеличения проницаемости ВЗГ.

В настоящее время не предложена единая теоретическая модель изменения проницаемости дисперсных пород при их подработке, что делает невозможным прогнозирование водопритока в выработки при

нисходящей фильтрации подземных вод через такой массив. Теоретически обосновываются только критерии наступления аварийного случая – прорыва подземных вод.

В данном случае преимуществом обладают эмпирические зависимости, полученные для гидрогеологических условий конкретного месторождения и позволяющие на основе рабочих оперативных и проектных геомеханических параметров ведения горных работ или показателей гидрогеологических условий месторождения, фиксируемых в рамках мониторинга среды, прогнозировать ожидаемые величины водопритока.

В связи с этим для первоочередного участка отработки месторождения были рассмотрены корреляционные связи между среднегодовым водопритоком к очистному пространству и тремя группами факторов: горные – количество пройденных в погонных метрах горных выработок, объем отбитой горной массы, приращение объема незаложенных пустот (относительно 2005 г); геомеханические – величины максимальных оседаний реперов, смонтированных в кровле – 370 гор. и на дневной поверхности; гидрогеологические – общая минерализация и концентрация хлорид иона в дренажных водах главного водосборника, понижение уровня подземных вод в нижнекаменноугольном и руднокристаллическом водоносных горизонтах в районе очистных выработок. В таблице 1 приведены коэффициенты корреляции между рассматриваемыми показателями и средние ошибки аппроксимации уравнений регрессии.

Из горных факторов статистически и теоретически обоснованным для прогноза общего водопритока к очистному пространству и отдельно из НВГ является приращение объема незаложенных пустот. Корреляционные зависимости с данным фактором характеризуются коэффициентами корреляции более 0,91 и ошибками аппроксимации не более 10%. Показатели проходки в погонных метрах и объемах обладают высокими ошибками аппроксимации (более 25%).

Сопоставление общего водопритока и отдельно из НВГ к зоне ведения очистных работ (рисунок 5) с оседаниями подрабатываемого массива демонстрирует наличие зависимости по экспоненциальному закону. Данные зависимости характеризуются низкой представительностью измерений, что снижает их достоверность, но подчеркивает потенциал к развитию маркшейдерских наблюдений в рамках комплексного гидрогеомеханического мониторинга.

Таблица 1 – Матрица коэффициентов корреляции между рассматриваемыми факторами и среднегодовым водопритоком к очистному пространству, а также средние ошибки аппроксимации уравнений регрессии в процентах (в скобках)

Фактор	Среднегодовой водоприток из НВГ	Среднегодовой водоприток из РВГ	Среднегодовой водоприток к очистному пространству
Погонные метры проходки	0,89 (25)	теоретически не обоснована	статистически не удовлетв.
Объем отбитой руды	0,83 (27,5)	теоретически не обоснована	статистически не удовлетв.
Приращение объема пустот относительно 2005 г.	0,96 (10,4)	теоретически не обоснована	0,91 (4,8)
Оседания кровли -370 гор.	0,99 (5,1)	теоретически не обоснована	0,93 (6,7)
Оседания поверхности	0,97 (6,8)	теоретически не обоснована	0,91 (5,7)
Понижение уровня в НВГ	0,91 (16,8)	-	0,99 (1,4)
Понижение уровня в РВГ	-	статистически не удовлетв.	0,89 (6,2)
Минерализация в главном водосборнике	-0,99 (9,2)	0,92 (16,2)	-0,92 (5,8)
Концентрация хлорид иона в главном водосборнике	-0,98 (10,7)	0,87 (12,2)	-0,89 (6,4)

Изменение показателя минерализации в рудничных водах главного водосборника тесно связано с величинами водопритока из НВГ и РВГ к очистным выработкам в отдельности с коэффициентами корреляции -0,9 и 0,92 соответственно (рисунок 6).

Аналогичные зависимости наблюдаются с концентрацией хлорид иона в главном водосборнике. Связь обоих показателей с общим водопритоком к очистному пространству также демонстрирует сильную

отрицательную корреляцию. С уменьшением данных показателей в дренажных водах закономерно растет величина водопритока из НВГ и общего к очистному пространству, но снижается из РВГ, что соответствует гидрохимическим особенностям водоносных горизонтов.

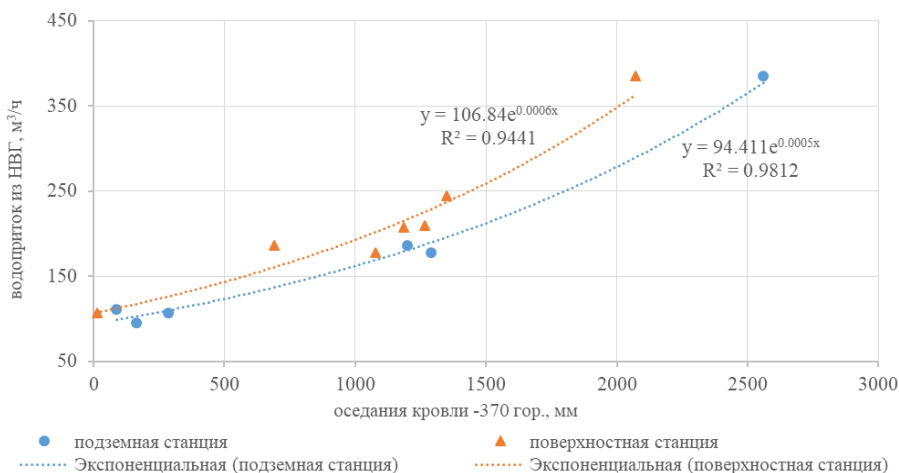


Рисунок 5 – Корреляционное поле сопоставления водопритока к очистным выработкам из НВГ с максимальными оседаниями реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций

Предложенные эмпирические зависимости для прогнозирования водопритока как удобной конечной величины, учитывающей влияние гидрогеологических, горных и геомеханических факторов, могут использоваться на текущем (первоочередном) участке месторождения.

Для прогноза изменения проницаемости пород ВЗТ и водопритока из НВГ на прилегающих участках целесообразно использовать более универсальный параметр, основанный на предпосылках теории фильтрации. Наиболее корректным и удобным для использования является эквивалентное фильтрационное сопротивление. Решение эпигнозной задачи и калибровка геофильтрационной модели в нестационарной постановке в период с 2005 по 2022 гг. позволила определить функцию его изменения во времени. Сопоставление оседаний подрабатываемого массива как определяющего фактора увеличения проницаемости с фильтрационным сопротивлением представлено на рисунке 7. Данную зависимость (формула №1), установленную для

первоочередного участка, целесообразно использовать для прогнозирования величины перетекания из НВГ.

$$\Phi = 0,38 \cdot e^{-0,001h} \quad (1)$$

где: Φ – фильтрационное сопротивление, сут/м²; h – оседания, мм.

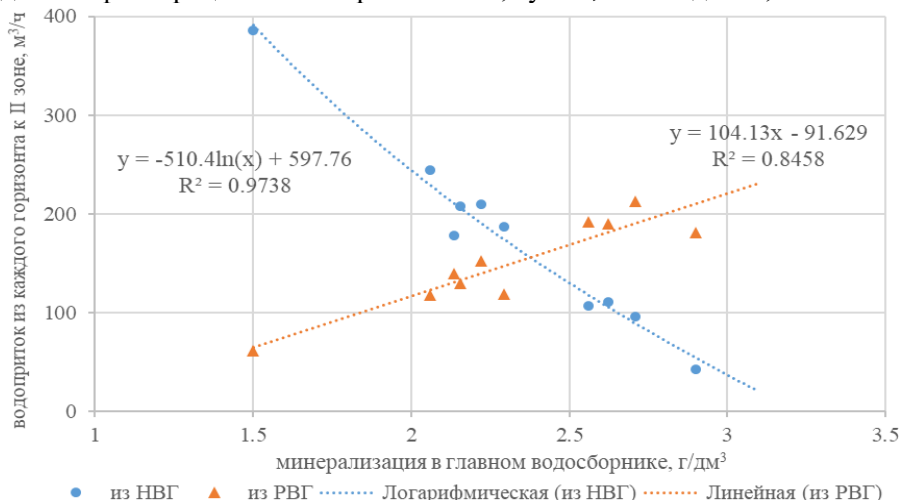


Рисунок 6 – Корреляционное поле сопоставления водопритоков из НВГ и РВГ к очистному пространству с минерализацией дренажных вод в главном водосборнике в 2005 г., 2008-2018 гг. и 2022 г.

Однако, если рассматривать прилегающие к первоочередному участки месторождения, то необходимо использовать не выявленную зависимость, а предложенный алгоритм её получения: значения функции изменения фильтрационного сопротивления в дискретном виде по площади (для определённых интервалов величины оседания рудной потолочины) можно получить на первоочередном участке и использовать при прогнозе водопритока на прилегающих путём создания системы мониторинга напоров и расходов в каждом блоке или группе блоков с аналогичными деформациями кровли 0-го слоя. Далее, аналитическим расчетом или с помощью геофильтрационного моделирования определяется значение фильтрационного сопротивления, соответствующее выбранному диапазону деформаций (степени нарушенности подрабатываемого массива), и выводится функция его изменения.

По величине максимальных деформаций технологические блоки целесообразно разделить на несколько групп: до 500 мм (9 и 10 блоки); в диапазоне значений 500-1000 мм (блоки 7 и 8); от 1000 до 1500 мм (блоки 2, 3 и 4). Более интенсивная добыча ведётся в 1 и 6 блоках, где деформации кровли 0-го слоя находятся в диапазоне 1500-2000 мм. Наибольшие деформации наблюдаются в 5 блоке, который можно выделить в отдельную группу с диапазоном 2000-2500 мм и более.

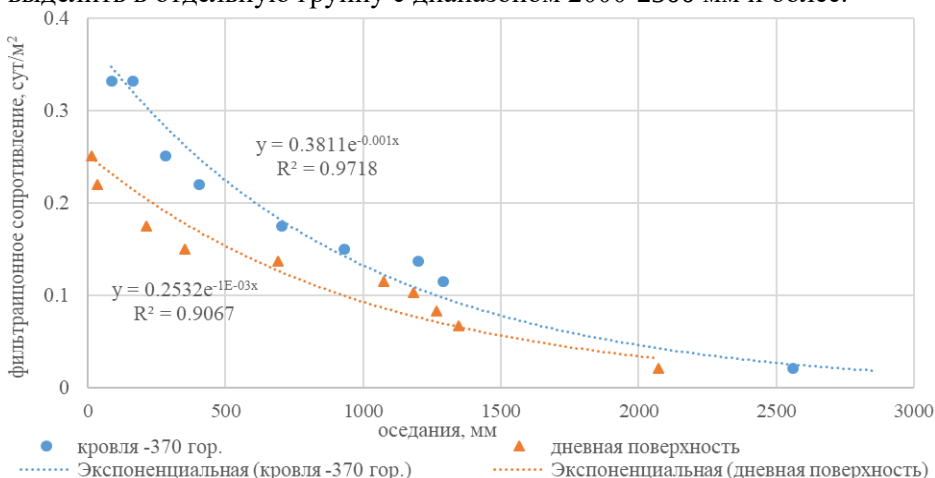


Рисунок 7 – Корреляционное поле сопоставления фильтрационного сопротивления с максимальными оседаниями реперов в кровле -370 гор

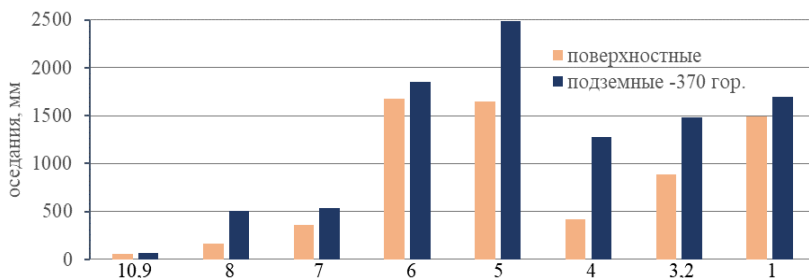


Рисунок 8 – Максимальные деформации по блокам (2022 г.)

3. Дискретизация очистного пространства на водобалансовые зоны с контролем минерализации и оптимизация частоты замеров уровней подземных вод нижнего водоносного комплекса повысят детальность и чувствительность системы гидрогеологического

мониторинга по отношению к изменению проницаемости водозащитной толщи.

К гидрогеологическому мониторингу предъявляется ряд требований к регулярности и информативности натурных наблюдений, которые должны обеспечивать возможность проведения их качественного и количественного анализа, предупреждения вероятных негативных изменений состояния среды. Немаловажным фактором при постановке гидрогеологического мониторинга является учет природных и техногенных особенностей конкретного месторождения. Для Яковлевского месторождения к таковым можно отнести наличие высоконапорного водоносного горизонта над выработками, технологию отработки месторождения с закладкой выработанного пространства при сохранении контура ведения горных работ в плане, изменяющуюся во времени схему формирования водопритока к очистным выработкам, наличие в кровле 0-го слоя целика с переменной проницаемостью.

В трудах Мироненко В.А. и Норватова Ю.А. присутствует тезис о необходимости развития и адаптации мониторинга к изменяющимся гидрогеологическим условиям в процессе отработки месторождения. Следуя данному тезису и учитывая природно-техногенные особенности Яковлевского месторождения на основе выявленных автором закономерностей изменения гидрогеологических условий можно обеспечить повышение эффективности мониторинга путем внедрения в практику натурных наблюдений и полученных ранее результатов. Совершенствование гидрогеологического мониторинга при увеличении водопритока через подрабатываемую водозащитную толщу с переменной проницаемостью к контуру дренажа с неизменной геометрией (в плане) должно фокусироваться на повышении чувствительности натурных показателей, оптимизации периодичности их измерений и увеличении пространственной дискретизации.

Чувствительность гидрогеологических показателей как индикаторов изменения водопритока к очистному пространству обоснована сильными корреляционными связями водопритока с минерализацией и концентрацией хлорид иона в главном водосборнике, понижениями уровней подземных вод в НВГ и РВГ. Оптимизация периодичности измерений выбранных целевых показателей произведена с помощью критерия соотношения ошибки измерений и среднего изменения величины показателя в единицу времени.

Исходя из хронологических графиков изменения уровней подземных вод в характерных скважинах на НВГ и РВГ оценивались среднемесячные приращения уровня подземных вод. Скважины, оборудованные на НВГ, были разделены на 2 группы исходя из его фильтрационной неоднородности в плане: лежащий бок в отличие от зоны над очистным пространством и висячим боком характеризуется низкими фильтрационными параметрами и несущественным влиянием дренажного эффекта рудника на уровненный режим.

Для большинства электроуровнемеров, хлопущек и датчиков давления точность измерений составляет 1 см. Таким образом, для групп скважин лежащего бока НВГ и всего РВГ рекомендуемый интервал между замераами составляет 3-4 дня, в то время как для скважин остальной части НВГ 2 раза в сутки. В будущем при увеличении степени сдвинутости водоносных горизонтов нижнего комплекса и выполаживании хронологических трендов изменения уровней подземных вод можно использовать данный метод для корректировки периодичности измерений. Учитывая динамику изменения водопритока к горным выработкам очистного пространства и сложность гидрогеологических условий ведения горных работ, такой подход к измерению уровней можно считать оптимальным.

Сдвигание горных пород над очистным пространством в условиях Яковлевского месторождения приводит к высокой аварийности наблюдательных скважин, что делает невозможным пространственную дискретизацию получаемой информации о изменении условий путем сгущения сети мониторинговых скважин.

Учитывая данное обстоятельство, а также эффективность объемно-весового метода для оценки схемы формирования водопритока, в работе предлагается альтернативный способ повышения дискретизации гидрогеологического мониторинга, сущность которого заключается в создании пунктов замера расходов и минерализации дренажных вод в районе съездов с -370 гор. на -425 гор. в каждом блоке, где осуществляется отвод рудничных вод далее, к главному водосборнику. Эффективность данного подхода подтверждается проведенными в 2022 г. замераами минерализации вдоль дренажного штрека, где осуществляется сброс дренажных вод с -370 гор. на -425 гор. из каждого технологического блока (таблица №2).

Такая постановка мониторинга позволит детальнее уточнить схему формирования водопритока, локализовать опасные участки и

скорректировать схему дренажа. Автоматизированная аппаратура может существенно упростить сбор натурных данных и сократить время реагирования на интенсификацию процесса перетекания подземных вод из НВГ.

Таблица №2 – Точки замера минерализации рудничных вод в дренажной канавке штрека лежачего бока до и после сброса дренажных вод с вышележащих горизонтов (по блокам)

Точка замера	8-й блок		7-й блок		6-й блок		5-й блок	
	до сброса	после сброса	до сброса	после сброса	до сброса	после сброса	до сброса	после сброса
М _{общ} , г/л	0,85	0,55	1,38	0,5	1	0,65	0,7	0,45

Поскольку в ранее проведенных исследованиях под руководством Дашко Р.Э. обосновывалась безопасная величина напора на кровле ВЗТ в размере 215 м, то в данной работе были предложены рекомендации по дренированию НВГ системой восстающих скважин до данных отметок в нестационарной постановке. Из рассмотренных вариантов оптимальным является система из 8 скважин (рисунок 8).

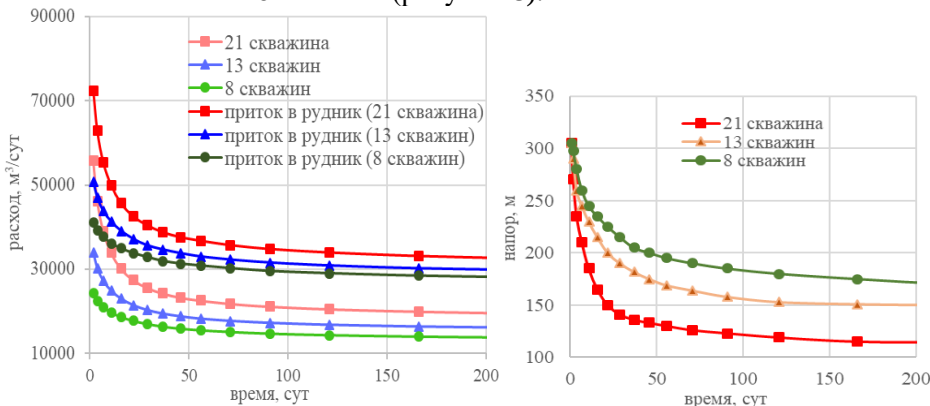


Рисунок 8 – Графики изменения напоров на подошве НВГ с начала работы дренажного контура и водопритоков к дренажному контуру и руднику в целом для рассматриваемых вариантов в нестационарной постановке задачи

Найденное решение характеризуется установившимся притоком к дренажному контуру скважин в размере 7 300 м³/сут, увеличением

общего водопритока в рудник с $16\,900\text{ м}^3/\text{сут}$ до $22\,200\text{ м}^3/\text{сут}$, а также снижением притока к очистным и капитальным выработкам с $16\,900\text{ м}^3/\text{сут}$ до $14\,900\text{ м}^3/\text{сут}$. Вместе с тем, с использованием геофильтрационной модели была найдена профильная граница зоны ненасыщенной фильтрации над выработками 0-го слоя, что позволит уточнить интервалы полевого определения проницаемости пород ВЗТ в рамках предусмотренных проектом пневмоиспытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы были получены научные и практические результаты в соответствии с поставленными целью и задачами исследования.

На основе полевых и камеральных работ выявлены предпосылки техногенного увеличения проницаемости водозащитной толщи в процессе её подработки. Установлены закономерности изменения схемы формирования водопритока в процессе строительства и эксплуатации Яковлевского рудника. Пересмотрены представления о роли техногенной составляющей в формировании водопритока к очистному пространству.

Для первоочередного участка отработки БЖР выявлены эмпирические зависимости прогнозирования водопритока на основе горных, геомеханических и гидрогеологических факторов. Установлены закономерности изменения проницаемости водозащитной толщи при её деформировании на первоочередном участке отработки БЖР. Разработан алгоритм получения данной зависимости для соседних участков отработки месторождения.

Обоснованы способы адаптивного совершенствования гидрогеологического мониторинга путем оптимизации периодичности измерений уровней подземных вод и дискретизации очистного пространства на несколько водобалансовых зон.

Разработаны мероприятия по снижению прорывоопасности из НВГ путем его дренирования до безопасных напоров системой восстающих дренажных скважин. Рассчитаны оседания дневной поверхности при реализации данным мероприятий.

Обоснованы безопасные параметры опытных скважин для проведения, предусмотренных проектом, пневмоиспытаний пород ВЗТ путем расчета сопротивления остаточных целиков сдвигу от действующих напоров и оценки зоны ненасыщенной фильтрации в теле водозащитной толщи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Геолого-гидрогеологические факторы формирования водопритоков в горные выработки Яковлевского рудника. С.Н. Котлов, Н.А. Целищев, Е.А. Сотник, Д.Х. Гилязов. // Горный журнал. - 2023. - № 5 - С. 108-113;
2. Котлов С.Н., Целищев Н.А., Горло М.А. Обоснование параметров скважин для проведения специальных гидрогеологических исследований в теле водозащитной толщи // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2023. - №6. - С.153-167;
3. Котлов С.Н., Целищев Н.А. Влияние деформаций горных пород водозащитной толщи на их проницаемость при разработке Яковлевского месторождения // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. - 2023. - Т. 49. - №. 4. - С. 11-19;
4. Sustainable Management of Transboundary Groundwater Resources: Past and Future. Golovuna E., Pasternak S., Tsiglianu P., Tselischev N. Sustainability 2021, - Vol. 13. - Iss. 21;
5. Котлов С.Н., Целищев Н.А. Геофильтрационная оценка возможности дренирования восстающими скважинами неосушенного водоносного горизонта над рудником // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2024. - № 12-1. - С. 212-226;
6. Целищев Н.А. Анализ гидродинамического режима на руднике при вскрытии подмерзлотных вод // Дневник науки. - 2020. - №. 7. - С. 7-7;
7. Целищев Н.А. Анализ изменений гидрогеологических условий при отработке месторождения под неосушенным водоносным горизонтом // Сборник статей XIII международной научно-практической конференции 25.07.2023 г. Пенза. С. 22-28.