

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Целищев Николай Анатольевич

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВОДОЗАЩИТНОЙ
ТОЛЩИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Специальность 1.6.6. Гидрогеология

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник
Котлов Сергей Николаевич

Санкт-Петербург – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	9
1.1 Актуальность вопроса ведения горных работ под водными объектами	9
1.2 Способы борьбы с прорывами подземных вод из вышележащих водных объектов	13
1.3 Обзор нормативных документов	17
1.4 Изученность вопроса прогнозирования водопритоков в горные выработки под водными объектами	20
1.5 История освоения КМА и Яковлевского месторождения.....	23
1.6 Выводы по I главе	32
ГЛАВА II МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	34
2.1 Используемые материалы	34
2.1.1 Физико-географический очерк	34
2.1.2 Геологическое строение Яковлевского месторождения	37
2.1.3 Гидрогеологические условия Яковлевского месторождения	50
2.1.4 Техногенный режим подземных вод Яковлевского месторождения.....	63
2.2 Методология	71
2.2.1 Теоретические сведения о методах научных исследований	71
2.2.2 Виды методических подходов в рамках диссертационной работы	74
ГЛАВА III ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОПРИТОКА.....	81
3.1 Факторы формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника.....	81
3.1.1 Предпосылки увеличения проницаемости в кровле очистных выработок	82
3.2 Оценка балансовых составляющих формирования водопритока с помощью объемно-весового метода	87
3.3 Оценка балансовых составляющих формирования водопритока с помощью метода численного геофильтрационного моделирования	94
3.3.1 Параметрическое обеспечение модели	95
3.3.2 Схематизация гидрогеологических условий исследуемого участка.....	99

3.3.3 Калибрация модели	101
3.3.4 Определение балансовых составляющих водопритока в рудник	105
3.4 Выводы по III главе	106
ГЛАВА IV ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПРИТОКА	108
4.1 Целесообразность использования эмпирических зависимостей и группы факторов для прогнозирования водопритока к очистным выработкам	108
4.2 Связь водопритока к очистным выработкам с горными факторами	109
4.3 Связь водопритока к очистным выработкам с геомеханическими факторами	114
4.4 Гидрогеологические факторы прогнозирования водопритока к очистным выработкам	117
4.5 Определение закономерностей изменения проницаемости водозащитной толщи	123
4.6 Обобщение результатов	128
4.7 Выводы по IV Главе	131
ГЛАВА V СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	134
5.1 Особенности постановки гидрогеологического мониторинга в условиях Яковлевского месторождения	134
5.2 Требования к показателям ведения мониторинга на Яковлевском месторождении	135
5.3 Обоснование периодичности измерений показателей гидрогеологической группы	137
5.4 Рекомендации по фиксации водопритоков к очистным выработкам	142
5.5 Прямые методы определения проницаемости водозащитной толщи	144
5.6 Мероприятия по снижению прорывоопасности подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта	148
5.6 Выводы по V главе	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акт внедрения	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Графики сопоставления модельных и натурных напоров	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Яковлевское месторождение является крупнейшим в России по запасам богатых железных руд (9,5 млрд т.), содержание железа в которых достигает 68 %. Его уникальность обусловлена не только промышленным потенциалом, но и сложностью горно-геологических условий его 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., Гвирцман Б.Я., Шокин Ю.П., Кацнельсон Н.Н., Мироненко В.А., Шестаков В.М., Норватов Ю.А., Хохлов И.В., Борисов А.А., Бошнятов 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, доказывається 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 также были использованы результаты, полученные в ходе проведения научно-исследовательских работ с участием автора: «Гидрогеомеханическое сопровождение отработки богатых железных руд на Яковлевском руднике» (2020 и 2021 гг.), «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» (2020-2021 гг.).

Апробация работы. Основные результаты исследований 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 диссертационного 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 и список литературы из 121 источника.

Благодарности. Автор считает обязательным выразить искреннюю признательность своему научному руководителю к.г.-м.н., в.н.с. Котлову С.Н., 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.

Основное содержание работы

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы:

актуальность проблемы и проведенных исследований, сформулирована цель работы, которая определяет задачи, представлены защищаемые положения, а также научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В рамках **первой главы** диссертации на основании анализа научных источников делаются выводы об актуальности исследования, его соответствии приоритетным научным направлениям в минерально-сырьевой отрасли, состоянии изученности процесса формирования водопритока в рудник через подрабатываемый целик. Рассматриваются положения о гидрогеологическом мониторинге среды на участках ведения горных работ под водными объектами, пути их совершенствования.

Во второй главе по мере описания природных и техногенных условий Яковлевского месторождения приводятся материалы и их источники, лежащие в основе диссертационной работы. Вместе с тем, обосновываются и характеризуются полевые и аналитические методы, использованные автором при сборе и обработке данных.

В третьей главе приводятся предпосылки увеличения проницаемости водозащитной толщи при её подработке, производится оценка схемы формирования водопритока к очистным выработкам во времени с использованием гидрохимических и гидродинамических методов, обосновывается подход к водозащитной толще как к слою с переменной проницаемостью, которая определяется степенью её техногенной нарушенности.

Четвертая глава содержит результаты факторного анализа влияния показателей ведения горных работ, деформирования вышележащего над выработками массива, а также показателей гидрогеологического мониторинга на величину водопритока к очистным выработкам. Устанавливаются, а также теоретически и статистически обосновываются уравнения регрессии, подходящие для использования в практических прогнозных целях.

В пятой главе обосновываются пути совершенствования гидрогеологического мониторинга для повышения безопасности эксплуатации Яковлевского рудника на основе оптимизации периодичности наблюдений за уровнями подземных вод и дискретизации очистного пространства на несколько водобалансовых зон. Формулируются рекомендации по дренированию нижнекаменноугольного водоносного горизонта для снижения прорывоопасности и проведению пневмоиспытаний.

Закключение представляет собой обобщение достигнутых результатов, их соответствие поставленным целям и задачам, перспективы дальнейших исследований.

ГЛАВА I СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Актуальность вопроса ведения горных работ под водными объектами

Как десятки тысяч лет назад, так и в настоящее время развитие цивилизации человека неразрывно связано с освоением природных ресурсов, роль которых в этом процессе стремительно растет: последние десятилетия характеризуются добычей минерального сырья в размерах 30-35 млрд. тонн в год. При этом человеком на сегодняшний день освоено более 170 видов полезных ископаемых.

Для сохранения уровня добычи и потребления сырья, а также продуктов его переработки в масштабах мировой экономики в условиях испытываемых трудностей в минерально-сырьевом комплексе, связанных со значительной выработкой запасов полезных ископаемых, доступных к выемке открытым способом, нарастает необходимость в освоении новых участков рудопроявлений, успех которого связан в том числе с оценкой гидрогеологических условий, напряженно-деформированного состояния массива и инженерно-геологических процессов на проектируемых и уже разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых [1, 2].

В связи с этим, немаловажным аргументом в пользу актуальности исследования служит глобальная тенденция мировой минерально-сырьевой отрасли к приращению добычи запасов стран посредством разведки и разработки месторождений полезных ископаемых в принципиально других, более сложных гидрогеологических и гидрогеомеханических условиях, в частности, разработка залежей руд под недренированными водоносными горизонтами и другими водными объектами [3, 4, 5].

Безусловно одним из важнейших видов полезных ископаемых, некогда переломившим ход человеческой истории и будучи актуальным на протяжении нескольких эпох, является железная руда, добыча которой в мировом масштабе оценивается около 1 млрд. тонн ежегодно. Весомой ролью в процессах разработки месторождений и переработки железных руд обладает отечественная промышленность: доля товарной руды, поставляемой Российской Федерацией на внутренний и внешний рынок составляет порядка 120 миллионов тонн в год, что подчеркивает значимость вопроса для отечественной промышленности и науки в сфере повышения эффективности и безопасности добычи.

Вышеперечисленное согласуется с мировыми стратегиями научно-технологического развития человечества. Нормы и принципы этих приоритетов развития, формулируемые в международных документах, разрабатываются на интернациональных конгрессах, конференциях и в специальных консалтинговых компаниях (KPMG, Deloitte Touch, PricewaterhouseCoopers и др.), находят отражение в планировании научных исследований Российской Федерацией в том числе применительно к горной науке.

Согласно документу «Актуальные проблемы научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации» среди направлений развития новых технологий и научно-технологического прогресса в минерально-сырьевом комплексе на ближайший временной период (до 2030 г.), к которым в рамках прогноза научно-технологического процесса уделяется особое внимание и вокруг которых существует необходимость создания условий для объединения усилий мирового сообщества, наиболее близким к рассматриваемой теме диссертации является направление рациональное природопользование.

Из анализа указов и распоряжений президиумов органов государственной власти России о стратегиях научно-технологического развития страны, изданных за последние 10 лет, можно сделать вывод о необходимости в стремлении к приращению экологически чистой, рациональной и безопасной составляющей недропользования [6-9].

Учитывая специфику различных научных школ и при этом необходимость в соответствии приоритетным научным направлениям развития, можно выделить несколько обсуждаемых острых и перспективных направлений будущего горнодобывающей отрасли, применительно к геодинамической безопасности, гидрогеологии и инженерной геологии месторождений полезных ископаемых, имеющих непосредственное пересечение с тематикой исследования:

- Развитие методов моделирования гидрогеологических процессов и гидрогеологического обеспечения безопасности ведения горных работ;
- Развитие методов и методик ведения гидрогеомеханического мониторинга при отработке месторождений для совершенствования технологии обеспечения безопасности горных предприятий;
- Комплексный мониторинг подземного пространства городов и горнодобывающих предприятий с целью развития системы раннего обнаружения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;
- Изучение механизмов взаимодействия природных и техногенных процессов, приводящих к росту аварийности.

Вышеприведённые формулировки, следующие из приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации, подчеркивают государственную важность и актуальность исследований, нацеленных на решение поставленных задач, а также иллюстрируют широкий спектр возможного их приложения для смежных отраслей инженерной деятельности человека.

Данные тематики, в рамках эффективного освоения недр и создания безопасных условий отработки месторождений, не раз поднимались на докладах Минстроя и Минэнерго РФ, что

связано с усилением техногенной нагрузки на недра, выработкой легкодоступных запасов, увеличением глубин отработки полезных ископаемых и переход к более сложным гидрогеомеханическим условиям.

Кроме того, в докладах X научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающей отрасли: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», проводимой в Горном институте, ведущие специалисты и руководители передовых горно-добывающих предприятий, члены Главгосэкспертизы и Технадзора РФ, а также ведущие научные сотрудники соответствующих направлений проектирования называли наиболее актуальным для отрасли вопрос прикладных исследований, которая испытывает в настоящее время острый их недостаток.

В широком понимании рассматриваемых вопросов, ситуация с недостатком прикладных исследований и внедрением высокоточных наукоёмких разработок в оценку, контроль и прогноз процесса ведения горных работ под водными объектами является комплексной и находит отражение в нескольких отраслях человеческой деятельности.

Как правило, это обстоятельство связано с:

1. Полной выемкой, либо завершением отработки рудопроявлений открытым способом и переходом к подземному способу добычи подкарьерных запасов. При этом часто карьеры или разрезы ликвидируются «мокрым» способом с частичным затоплением, что усложняет гидрогеологические условия дальнейшей отработки и провоцирует риски прорыва вод в подземные выработки [10, 11, 12]. В настоящее время только среди отечественных горных предприятий известно большое количество подобных случаев, среди которых месторождения алмазонасных кимберлитовых трубок «Айхал», «Удачная», «Интернациональная» и др. [13-16], где производится доработка алмазных руд подкарьерных запасов в условиях оставленного охранного породного целика под подошвой водных объектов. Исходя из работ сотрудников «Якутнипроалмаз» можно сделать вывод об актуальности создания систем защиты и совершенствования методик контроля (мониторинга) участков рудников, на которых возможны событийные катастрофические геологические процессы и явления, такие как прорывы подземных вод из отработанных затопленных карьеров в горные выработки [17, 18].
2. Отработкой нижележащих горизонтов под затопленными подземными выработками, неудачными примерами которого являются аварии на шахтах «Буланац» и «Вахрушевуголь» с обрушением кровли и затоплением лавы, подрабатывающей затопленные выработки [19-24]. Подобные случаи известны и не раз происходили на шахтах Московского угольного бассейна, ретроспективный анализ аварий которого для целей прогноза анализа аварийности показал, что в конце 2010-х годов существенная доля чрезвычайных ситуаций на рудниках была связана с

прорывом подземных вод и пульпы из имеющихся на вышележащих горизонтах горных выработок [25].

3. Проходкой выработок в самих водозащитных целиках (железрудное месторождение «Таштагольское»), калийный рудник «Иессенитц» [26, 27, 28]. Подобные работы требуют высокой степени обоснованности безопасных параметров ведения горных работ и четкий регламент проведения контроля за изменением как геомеханической, так и гидрогеологической составляющими геологической среды.

4. Разработкой залежей под поверхностными водотоками и водоёмами искусственного и естественного генезиса (гидроотвалы, хвостохранилища, реки, озера, пруды, моря, океаны). По словам руководителя проекта исследований месторождений полезных ископаемых дна мирового океана геологической службы США Джеймса Хайна, высказанным в 2018 году, коммерческая добыча таких металлов, как золота, серебра, цинка и меди из областей срединно-океанических хребтов начнется уже через 5 лет. В настоящее время уже существует ряд месторождений твердых полезных ископаемых в Японии и Канаде, которые разрабатываются под морскими водами: месторождение цинка «Izena» Окинава, поставляющее цинк для промышленности Японии. Здесь следует в очередной раз подчеркнуть важность исследований в данном направлении ввиду высокой аварийности на рудниках под водными объектами [29, 30, 31]. Так, в Германии при недооценке механизма развития водопроводящих трещин между водными объектами и горными выработками ввиду высокой степени недоизученности геолого-гидрогеологических условий и недостаточной разработанностью методик оценки и контроля прорывоопасности было закрыто свыше 20 калийных рудников, среди которых около 8 соляных копей в Магдебург-Гальберштадтском районе, также рудники Фор дер Гейт, Иессенитц, Финенбург, Агата, Фридрих-Франц, Роненберг и другие [26, 32].

5. Ведением горных работ под неосушенными напорными водоносными горизонтами. Примерами тому могут служить месторождения «Яковлевское» (КМА), «Октябрьское» (Норильский горнорудный район), три шахты Подмосковского угольного бассейна, рудник «Анна» (Германия), аварийный и ныне закрытый рудник «Selby coalfield» (Англия), «Березниковский калийный рудник III», множество соляных рудников Соль-Илецкого, Староинского, Верхнекамского и Солотвинского месторождений и др. [33-36]. Весомое число аварий происходило при освоении подземным способом соляных залежей в Канаде, где в результате прорывов подземных вод из крупных тектонических нарушений и перекрывающих недренированных водоносных горизонтов были затоплены такие копи как «Пейшн Лейк», «Ванской», «Джеральд К2», «Колоней» [26]; действующий урановый рудник «Макартур-Ривер» и «Саскачеванский» рудник, на которых накоплен более чем 30-летний опыт борьбы с прорывами подземных вод.

В подавляющем большинстве случаев интенсификация величины водопритока, как следствие прорывов воды, приводят к снижению уровня прибыльности горного производства и необходимостью мириться с временными остановками или даже окончательным закрытием горного предприятия. Именно это случилось с участком №2 в колчеданной шахте Конкола (Замбия), которая была закрыта после того, как в течение первых семи месяцев работы было выкачано $1,4 \cdot 10^6$ м³ воды, что так и не привело к значительному снижению пьезометрического уровня. Эту шахту обычно считают самой обводненной шахтой на Земле: из нее выкачивали более 16 000 м³/час с пиком в 17 700 м³/час в июне 1978 года. Шахта была закрыта спустя 6 лет из-за очередного внезапного прорыва воды в горные выработки.

Отдельного внимания заслуживают примеры и перспективы освоения подземного пространства под водными объектами в рамках градостроительных проектов. Проведенные эколого-экономические оценки перспектив освоения подземного пространства под водными объектами в условиях непрекращающегося роста мегаполисов, требуют сооружения новых транспортных потоков и коммуникаций, объектов социальной и культурной сферы, обслуживающих производств и промышленных мощностей [3, 37].

Таким образом, опыт разработки месторождений под различными водными объектами на протяжении всей истории горного дела демонстрирует высокую актуальность в вопросах оценки, прогнозирования и мониторинга гидрогеомеханических условий ведения горных работ. Как было показано выше, недостаточная изученность гидрогеологических условий, отсутствие предупреждающих мероприятий или простое игнорирование наличия перекрывающих в разрезе водных объектов приводит к возникновению аварийных ситуаций или даже прекращению добычи полезного ископаемого.

1.2 Способы борьбы с прорывами подземных вод из вышележащих водных объектов

Как правило, среди теоретических и практических методов решения проблем, встречающихся в отечественном и зарубежном опыте разработки месторождений подземным способом под водными объектами можно выделить предупреждающие мероприятия, контроль во время эксплуатации объектов (мониторинг) и способы ликвидации последствий аварийных ситуаций, связанных, как правило, с прорывами подземных вод в горные выработки.

Применение специальных расчетных методик целиков безопасности, прогноз границы распространения зоны водопроводящих трещин и геомеханического моделирования для расчета и обоснования безопасных параметров добычи полезных ископаемых с целью предупреждения негативных гидрогеомеханических процессов и превышения допустимого водопритока можно отнести к предупреждающим теоретическим методам [38, 39, 40].

Существует ряд хорошо себя зарекомендовавших методик отдельных авторов и научных коллективов, которые в хронологическом развитии своих положений прошли апробацию опытом и, как правило, применяются на усмотрение автора или организации, а некоторые из них входят в нормативные документы [41, 42, 43]. Так, например, ввиду того, что одной из эффективных мер защиты горных выработок от подземных и поверхностных вод является оценка степени нарушенности массива, которая контролируется через развитие зоны водопроводящих трещин (ЗВТ), а точнее, по прогнозу местоположения ее верхней границы, приуроченной к слою с граничной кривизной, то на основании опыта разработки угольных месторождений на территории СССР коллективом ВНИМИ были разработаны методические указания по оценке ЗВТ, которые в последствии модернизировались учеными для различных условий отечественных и зарубежных пластовых месторождений.

Одна из самых распространённых расчетных методик оценки прогноза развития ЗВТ, полученная по результатам эмпирических исследований и ориентированная на пластовые сланцевые и угольные месторождения с одинаковой мощностью подрабатываемых слоев, содержит в своей основе идею об определенности геометрических параметров зоны водопроводящих трещин в зависимости от мощности вынимаемого пласта и мощности глинистых отложений в перекрывающей толще, к которым относятся также и глинистые сланцы, алевролиты, аргиллиты и т.д [38]. Таким образом, высота зоны водопроводящих трещин будет тем больше, чем меньше в подрабатываемой толще глинистых пород.

Однако, существует ряд ограничений применения данной методики, ввиду того, что положение слоя с граничной кривизной, соответствующей верхней границе ЗВТ, зависит не только от содержания мелкодисперсных связных пород, но также от скорости и глубины ведения горных работ, угла падения и структуры толщи горных пород, тектонической обстановки, которая определяет начальные условия напряженно-деформированного состояния массива, положения уровня подземных вод и степень химической и биологической агрессивности перетекаемых из вышележащего водоносного горизонта вод, способных увеличивать пористость, трещиноватость водозащитной толщи, тем самым интенсифицировать образование в её теле водопроводящих пустот, что особенно актуально для калийных рудников, где даже незначительное количество водопроводящих трещин может в итоге привести к их затоплению.

В работах В.Н. Гусева реализуется попытка учесть при оценке параметров ЗВТ сложную геологическую структуру месторождений, путём введения в расчет относительного центра изгибающихся слоев, тем самым адаптировать вышеприведённую методику к сложному геологическому строению [38]. Стоит также отметить, что данная методика была успешно реализована в диссертационной работе Малюхиной Е.В. при обосновании параметров

геомеханических процессов развития техногенных водопроводящих трещин на Яковлевском месторождении [44].

Несмотря на обоснованную эффективность данной методики, она не подходит для ряда инженерно-геологических условий, характеризующихся наличием в толще рыхлых песчаных и пылеватых или мягких связных пород, обладающих не хрупким характером разрушения. Как правило, деформирование таких пород приводит к более сложному характеру изменения порового пространства. Увеличение проницаемости происходит за счет разуплотнения пород, переориентации частиц и распространяется на всю толщу, в то время как в скальных и полускальных породах в определённом диапазоне мощности образуется система нормально секущих водопроводящих трещин, водопроводимость которых скачкообразно растёт при их раскрытии.

Другим немаловажным предупреждающим способом отработки залежей твердых полезных ископаемых под водными объектами является защита рудников от подземных и поверхностных вод путём оставления защитного целика. На ранних этапах развития горной промышленности в калийных рудниках Германии, Канады, России, на угольных и железорудных месторождениях Японии из-за недостатка геолого-гидрогеологической изученности часть выработок прокладывалась непосредственно под неосушенными водоносными горизонтами и другими водными объектами, что приводило к скорому закрытию предприятий в следствии аварийных затоплений [26]. Уже позднее, при разработке месторождений в подобных условиях стали руководствоваться опытными данными и оставлять водозащитные целики: для угольных и железорудных шахт Японии их мощность составляла порядка 50-100 м, на калийных месторождениях Германии мощности целиков стали обосновывать расчетами, в основе которых лежали некоторые положения вышеупомянутых методик и эмпирические наблюдения. С 1970-х годов XX века для шахт Донецкого угольного бассейна величина безопасного породного целика оценивается через произведение мощности вынимаемого пласта и коэффициента безопасности, значения которого выведены эмпирическим путём и находятся в зависимости от размера подрабатываемого водного объекта, углов падения пластов и совокупной мощности глинистых слоёв [44].

Глубины отработки угольных месторождений северо-восточной Англии, продуктивные пласты которых часто залегают под морским дном, определяются из соотношения (1.2.1) [45]:

$$H_6 = C \frac{\eta}{E} \quad (1.2.1)$$

где: C – справочный коэффициент с графика оседания поверхности; η – максимальная величина вертикальной деформации рудной потолочины; E – максимальная допустимая величина осадки дна моря, которая как правило принимается равной 10 мм/м.

Аналогичными подходами определяется величина целика безопасности в таких нормативных документах как ПБ 07-269-96, СП 103.133302012 и ПБ 03-555-03. Подобные эмпирические методы отнесены к I и III группам расчетов согласно [46]. Они в значительной степени трудоёмки, так как требуют экспериментального определения прочности пород на прорыв или опыта разработки подобных месторождений и не дают достоверных результатов.

Согласно диссертационной работе Е. Феллер, к II группе расчетов отнесены те разновидности расчетов, в основе которых лежат представления строительной механики о деформировании и разрушении целиков по типу строительных конструкций: балок, перекрытий и т.д. Такие методы, несмотря на более обоснованную параметрическую базу, как и I с III не дают достоверных результатов ввиду того, что работа породного целика имеет более сложный характер. Приложением методов строительной механики к прогнозу критических деформаций целиков горных пород, выполняющих водозащитные функции, занимались такие ученые как А.А. Борисов, В.Д. Слесарев, Ж.М. Канлыбаев и др.

Наиболее точный прогноз позволяет сделать формула IV-ой из выделенных в работе групп методов – формула В.А. Мироненко-В.М Шестакова (1.2.2), в которой разрушение целика представляется по типу сдвига и требует для расчета прочностных параметров и удельного веса пород, слагающих целик, напора над его кровлей, ширины пролета выработки, мощности целика и коэффициента бокового распора [46], Мироненко-Шестаков:

$$H_{\text{пр}} = \frac{m}{\gamma_{\text{в}}} \left(\gamma + \frac{2c}{b - tg\varphi \cdot m\zeta} \right) \quad (1.2.2)$$

где: c – сцепление пород; b – ширина выработки; ζ – коэффициент бокового распора; φ – угол внутреннего трения пород; m – мощность водозащитной толщи; γ и $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес пород и воды соответственно.

Каждая из приведённых методик имеет свои преимущества и недостатки для условий конкретного месторождения, однако, практически ни в одной из них не рассматривается вопрос количественной взаимосвязи изменения водопритоков в горные выработки от степени и характера деформаций водозащитного целика: каждый из существующих подходов позволяют с той или иной достоверностью определить параметры и условия наступления аварийного случая – прорыва подземных вод в горную выработку.

Однако, к настоящему времени не предложена единая теоретическая модель сдвижения водонасыщенного массива рыхлых или мягких связных пород при его подработке, позволяющая оценивать и прогнозировать величину водопритока, поступающую вследствие перетекания подземных вод из вышележащего водного объекта. В связи с этим остаются актуальны вопросы поиска функциональной зависимости между ростом деформаций водозащитного целика и его проницаемостью для достоверной оценки и прогноза водопритока

к горным выработкам, корректировки дренажных мероприятий и развития мониторинговой гидрогеологической сети месторождения.

Следует отметить также разработку мероприятий по опережающему забой снижению уровней подземных вод в массиве, дренажу перекрывающих водонасыщенных пород, который имеет ряд ограничений. Он актуален лишь для рентабельных условий и часто невозможен на водных объектах экологической ценности или объектах, используемых для стратегического хозяйственно-питьевого назначения [47];

Среди прямых натуральных методов определения изменяющейся во времени проницаемости или контроля положения верхней границы зоны водопроводящих трещин распространены геофизические, гидрогеологические, геомеханические, аэрологические и буровые. Методик определения положения верхней границы ЗВТ существует обильное разнообразие, однако, регламентирование проведения каждой из них в отдельности, применительно к конкретным условиям месторождения или групп месторождений, не отражено в нормативных документах [44]. При этом результаты подобных опытов не позволяют осуществлять прогноз развития ЗВТ, и, соответственно, должны выполняться совместно с проведением расчетных методик. Также, для осуществления таких методов часто требуется обоснование безопасных параметров проходки скважин и способов их последующей ликвидации, что накладывает определённые ограничения их применимости.

Использование средств инженерной мелиорации как в рамках предупреждающих мер сооружения противofiltrационных завес, так и мероприятий по ликвидации последствий аварий происходит с привлечением методов заморозки, смолизации, силикатизации, глинизации, цементации, битуминизации, нагнетаний тампонажных растворов, установки специальных типов крепей с набрызг и торкрет бетоном, геомембран и т.д., [48-53]. Также, распространёнными методами борьбы на уже существующих участках прорывов вод в горные выработки являются сооружения водонепроницаемых перемычек с закрытием и ликвидацией аварийной выработки [54].

1.3 Обзор нормативных документов

Вопрос разрешения технических аспектов разработки месторождений под водными объектами и водонасыщенными горными породами во многом определяется наличием и проработанностью нормативной документации, которая при всей важности изучения озвученных вопросов на данный момент действительно испытывает недостаток качества и имеет приложение, как правило, для пластовых угольных месторождений, а значит требует значительных изменений, исследований и расширения области применения [55].

В существующих нормативных документах, вопросу выявления взаимосвязи, прогнозированию и контролю за изменением проницаемости водозащитных целиков в зависимости от степени их подработки и напряженно-деформированного состояния посвящены лишь краевые варианты оценки, при которых рассматривается ситуация прорыва подземных или поверхностных вод, то есть вариант наступления непосредственно аварийного случая, а также косвенные (понятийные) указания на взаимосвязь водопритока и деформаций. Такие подходы характерны для следующих документов: «Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях. 1992 г.», «Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. 1992 г.». Ранее используемые и применяемые в настоящее время нормы и правила: СНиП 2.06.14-85. «Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод», «Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. 1976», «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. 1998г», «Правила технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт», «Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком угольном бассейне, 1972 г», «Временная инструкция по определению размеров предохранительного целика под водоносными горизонтами и водоёмами при отработке системами с твердеющей закладкой. НИГРИ, 1988 г», «СНиП 2.06.14-85. Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод: Госстрой России 1998 г». Данные документы являются сильно устаревшими с точки зрения их адаптации к новым, более сложным гидрогеомеханическим условиям ведения горных работ на больших глубинах и по отношению к уровню современных технологий, однако, всё ещё используются для оценки условий наступления аварийного случая при подработке водных объектов.

Как отмечалось ранее, используемые и для рудных месторождений ПБ 07-269-96, СП 103.133302012 и ПБ 03-555-03 регламентируют расчет мощности целика безопасности, не используя прочностных параметров горных пород, а лишь исходя из мощности проектируемой водозащитной толщи и коэффициента, произведение которых определяет предельно допустимый напор на кровле целика. Данному подходу порядка 50 лет и он хорошо зарекомендовал себя для Донецкого угольного бассейна виду того, что для геолого-гидрогеологических условий бассейна многолетним опытом, на аварийных участках получены характерные коэффициенты. Очевидно, что такие методики не имеют потенциала к оценке и прогнозированию изменения во времени проницаемости водозащитных толщ при их подработке.

Особенно острый недостаток нормативно-методических материалов наблюдается с регламентами проведения гидрогеологического и гидрогеомеханического мониторинга на

горнодобывающих предприятиях в целом и тех, что разрабатываются под водными объектами в частности, которые, как правило, создаются для конкретного предприятия. Уместно привести проверенные временем документы второй половины XX в, которые носят преимущественно универсальный характер и могут использоваться для создания мониторинговой гидрогеологической системы месторождения и проведения специальных гидрогеомеханических исследований проницаемости породных целиков: «Методические указания по гидрогеологическому обслуживанию угледобывающих предприятий: ВНИМИ, 1975 г.», «Рекомендации по определению фильтрационных характеристик горных пород в зоне неполного водонасыщения методом нагнетания воздуха в скважины при инженерных изысканиях в строительстве. ГИДРОПРОЕКТ. 1976 г.», «Рекомендации на бурение скважин на потенциально опасных по нарушению сплошности водозащитной толщи участках в районах скважин №492 БКПРУ-4, №69 СКРУ-1 и в юго-восточной части шахтного поля БКПРУ-2. СПб., Фонды АО «ВНИИГ». 2015», «Обоснование видов и периодичности наблюдений и опробования. Рекомендации по организации гидрогеологического мониторинга по сети скважин на потенциально опасных по нарушению сплошности водозащитной толщи участках в районах скважин №492 БКПРУ-4, №69 СКРУ-1 и в юго-восточной части шахтного поля БКПРУ-2». СПб, Фонды АО «ВНИИГ». 2016.

Очевидно, что текущее положение имеет место быть и должно учитывать специфику конкретного месторождения в области ведения комплексного мониторинга массива, но при этом требует новых универсальных решений и норм для сходных групп месторождений, а также применения высокочастотных приборов измерения. Наглядной попыткой разрешения такой проблемы может являться пример создания институтом ВИОГЕМ (Белгород) документа «Методическое руководство определения границ зон, опасных по прорывам воды в горные выработки на месторождениях алмазов АК «АЛРОСА» 2005 г.». Однако, такие примеры единичны, требуют доработки и расширения сферы своего применения.

В настоящее время требования к объектному мониторингу как подсистемной части мониторинга состояния недр на месторождениях твердых полезных ископаемых и зонах их техногенного влияния регламентируются документом «Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых» (ММТПИ), утверждённым Министерством природных ресурсов от 4 августа 2000 г. При этом регламенты для ведения мониторинга геологической среды, учитывающие специфику конкретного месторождения, хоть и базируются на ключевых положениях проекта разработки месторождения, но, как правило, являются результатом отдельных специально заказанных работ, которые, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 30 ноября 2021 г. №2127 «О порядке согласования и утверждения технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых,

технических проектов строительства и эксплуатации подземных сооружений, технических проектов ликвидации и консервации горных выработок, буровых скважин и иных сооружений, связанных с использованием недр, по видам полезных ископаемых и видам пользования недрами», не подлежат процедуре согласования с комиссией, создаваемой Федеральным агентством по недропользованию или его территориальными органами. Таким образом, разрабатываемые регламенты ведения гидрогеологического мониторинга на конкретных месторождениях формально обязаны соответствовать требованиям ММТПИ, но фактически не проходят экспертизы и не подлежат в должной степени государственному контролю.

Следует также отметить, что сам документ ММТПИ имеет широкий спектр общих требований к регулярности и информативности наблюдений, преследующих цель обеспечения органов управления государственных фондов геологической информацией без привязки к частным методам ведения мониторинга. Данное обстоятельство повышает актуальность разработки новых подходов к ведению мониторинга на месторождениях, учитывающих специфику выемки полезного ископаемого под неосушенными водными объектами.

1.4 Изученность вопроса прогнозирования водопритоков в горные выработки под водными объектами

Оценка условий освоения подземного пространства различных месторождений под водными объектами является неразрывно связанной с изучением особенностей формирования и изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород разделяющей потолочины, механизмов их сдвижения с учетом параметров проходки горных выработок в различных геологических и горно-технических условиях, а также исследованием влияния горно-геомеханических процессов на формирование и прогноз водопритоков в горные выработки.

Если рассмотреть поднимаемые вопросы в плоскости наук, в сфере изучения которых они находятся, то можно заметить, что тематика исследования находится на пересечении областей знаний нескольких дисциплин: динамики подземных вод, гидрогеохимии и механики горных пород, приложенных в рамках горной промышленности. Исследованию каждой из них в отдельности на протяжении истории развития отечественной и зарубежной науки уделялось большое количество внимания, результатом чего является глубокая разработанность теоретических основ фундаментальных дисциплин, подтверждающаяся многочисленными практическими данными.

Формированию техногенного режима подземных вод при разработке месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом, формированию и прогнозу водопритоков к горным выработкам посвящено множество исследований и научных работ Мироненко В.А.,

Мольского Е.В., Норватова Ю.А., Сердюкова Л.И., Бокого Л.Л., Стрельского Ф.П., Крячко О.Ю., Рюмина А.Н., Лебедянского З.П., Плотникова И.И., Кашковского Г.Н., Шестакова В.М., Скиргелло О.Б и др.

Из основных методов расчетов, при удачном приведении реальных условий к типовой расчетной схеме, можно выделить способ «большого колодца» - удобный и эффективный способ, позволяющий легко определить величину общего водопритока в типовых условиях даже в пластах с фиксированными границами для условного радиуса питания.

Расчеты установившейся фильтрации для более сложной геометрии рудника часто ведут по выделенным лентам тока, в частности после приведения их к плоским для удобства применения закона Дарси [56]. При неуставившемся же режиме расчет по характерным лентам тока может быть произведен, используя принцип недеформируемых линий тока.

Однако, ввиду того, что большинство месторождений полезных ископаемых или их групп обладают уникальным сложным строением, реальные условия которых часто бывает невозможно привести к типовой расчетной схеме, то в данном вопросе выходом из ситуации служит численное геофильтрационное моделирование, которое не только позволяет качественно и количественно спрогнозировать водоприток, но и сделать это достовернее, при высокой степени изученности условий. При этом компании-лидеры в данной области стараются создавать модели месторождений с постоянно действующим статусом, что позволяет в будущем быстро менять её конфигурацию во времени в зависимости от особенностей дальнейших проектов разработки месторождений [57].

В основе ведения расчетов в программных пакетах для гидродинамического моделирования лежат те же аналитические зависимости, используемые при инженерных расчетах, такие как: закон Дарси, уравнения Буссинеска, Дюпюи, Фурье, Форхгеймера, Навье-Стокса и другие. Среди программных пакетов, используемых для геофильтрационного моделирования и моделирования комплексных задач устойчивости подземных горных выработок можно выделить: Processing Modflow, Visual Modflow, Modflow Flex, GMS, Phase, Slide, GEO, Ansis, Feflow, Plaxis, GeRa, НИМФА и др.

Для целей гидрохимического моделирования процессов миграции компонентов, растворения горных пород и материалов инженерных конструкций, комплексобразования, осаждения, гидратации и многих других процессов используются такие программные пакеты как PHREEQC, PHAST, PHRQPITZ, WAREG, HST3D, BIOCHLOR, BIOPLUMER, GEOEAS, MODFLOW, HSSM, PESTAN и другие [58].

В научно-методическую проработку вопросов гидрохимического метода в гидрогеологии внесло множество отечественных и зарубежных ученых: труды в сфере особенностей и факторов формирования химического состава подземных вод, поведения

компонентов подземной среды и их взаимодействия, количественной оценки физико-геологических явлений (подземной денудации, карсту и т.д.), интерпретации геологических условий (структур, тектонических нарушений, элементов геоморфологии и литологическому составу пород), определения времени водообмена по данным гидрохимического режима, оценки гидрохимических и геохимических процессов растворения, выщелачивания, гравитационного выщелачивания, смешения и концентрирования подземных вод, гидрохимических равновесий вода-порода, определения направления и действительной скорости фильтрации подземного потока, оценки инфильтрационного питания подземных вод принадлежат таким исследователям как А.Н. Огильви, А.И. Перельман, А.Н. Павлов, А.И. Коротков, В.Н. Шемякин, И. Каплан, М. Баас-Беккинг, О.Я. Самойлов, К.П. Караванов, Го Окамото, О.А. Алёкин, В.А. Сулин, И.К. Зайцев, Н.И. Толстихин, Н.К. Игнатович, Е.В. Посохов, В.С. Самарина, Ф.Ф. Лаптев, Н.В. Родионов, Л.С. Балашов, В.П. Зверев, В.Г. Ясько, Ю.И. Шутов, В.Н. Дублянский, Г.Н. Каменский, Н.Н. Веригин, В.Д. Ломтадзе, А.А. Карцев, С.Б. Вагин, М.Г. Валяшко, Г.М. Гаррелс, Ч.Л. Крайст, В.А. Кирюхин, А.А. Коноплянцев, В.С. Ковалевский, В.Г. Румынин и др. [59].

Говоря о количественной оценке и прогнозировании деформаций горных пород, изменении их напряженного состояния и свойств, исследованиях механики грунтов и горных пород, то следует сказать, что их фундаментальные основы и прикладное значение берут начало в своём научном ключе в конце 19 века. На начальном этапе идеи данного направления развивали такие ученые, как Якоб Штейнер, Кик, Ж.В. Буссинеск, В.И. Курдюмов, П.А. Миняев.

В последствии результаты их исследований развивали и приумножали такие отечественные и зарубежные ученые, как К. Терцаги, Н.И. Иванов, В.В. Охотин, М.Н. Гольдштейн, Б.И. Далматов, В.А. Зурнаджи, З.Г. Тер-Мартirosян, Н.А. Цытович., М.И. Сумгин, Н.В. Орнатский, В.В. Соколовский, А.Н. Ничипорович, А.Г. Шапарь, Н.Н. Маслов, С.Б. Ухов, Г.Л. Фисенко, Н.М. Герсегованов, М.М. Протодеяконов, П.М. Цимбаревич, И.С. Мухин, В.Д. Слесарев, Р.Э. Дашко, Ю.А. Ельцов, И.В. Абрамов, А.Г. Протосеня, В.П. Беркутов, А.Г. Оловянный, В.Н. Земисев, С.А. Медягцев, В.Н. Дешковский и др., исследуя и приложение механики горных пород к целям подземного строительства.

Вместе с тем развивали идеи влияния скорости и объёма проходки горных выработок, способа ведения горных работ, первичной и повторной подработки пластов на формирование водопритоков в подземные горные выработки. Но лишь небольшая часть исследований посвящена изучению особенностей деформирования целиков горных пород под водными объектами, водонасыщенными горными породами и, как следствие, изменения проницаемости

этих пород; постановке мониторинга гидрогеомеханического и инженерно-геологического состояния массива для повышения безопасности ведения горных работ.

Часть работ посвящена более детальной, количественной оценке взаимосвязи деформаций целика, образованию водопроводящих трещин и изменению водопритоков в горные выработки, при этом наиболее изученным направлением является угольная промышленность. Однако, здесь следует отметить, что определение ЗВТ концептуально не отличается от случая расчета прорыва подземных или поверхностных вод в горные выработки, так как рассматривает краевое условие – аварийную ситуацию, при которой проводимость по трещинам принимается стремящейся к бесконечности. Поэтому исследования носят, как правило, понятийный (причинно-следственный) характер либо делают акцент на расчет предельного состояния – аварийного случая, при котором происходит раскрытие нормально секущих трещин и прорыв подземных или поверхностных вод в горные выработки [43].

Более детально тематикой постепенного изменения проницаемости целиков в конце XX начале XXI века занимались ученые ИПКОН РАН, коллектив которого под руководством доктора технических наук М.А. Иофиса разработал классификацию условий подработки водных объектов, согласно которой они делятся на весьма опасные, опасные, средней опасности, малоопасные и безопасные. Критерием разделения условий на группы была выбрана величина относительной горизонтальной деформации разделяющего слоя. Для каждого типа условий были предложены меры защиты [19-21, 61].

Несмотря на то, что данное исследование является наиболее близким к специфике выбранной темы, в нем даётся качественная, описательная характеристика величины проницаемости, соответствующей определённой степени деформации породы. При этом сама характеристика проницаемости выражена в отношении возможностей рудничного водоотлива или водоотлива определённого участка шахты, что весьма условно и различается для условий отдельных месторождений. Более того, существует определённая специфика фильтрации при прорыве воды из водного объекта (затопленных горных выработок) и водонасыщенной горной породы, заключающаяся в разности величин их водопроводимости по отношению к образующимся трещинам.

1.5 История освоения КМА и Яковлевского месторождения

История открытий, разведки, исследований и освоения железорудных месторождений КМА берёт начало 250 лет назад, когда в рамках экспедиции по определению точных координат группы городов на юго-западе Российской империи и исследованию возможности сооружения канала в междуречье Волги и Дона в 1773 г. академиком Петербургской АН

Иноходцевым Петром Борисовичем были обнаружены магнитные аномалии в районе города Курска.

С тех пор и до момента первого промышленного освоения в 1932 г. проводилось множество исследований под руководством Пильчикова И.П. (1883 г.), Сергиевского Д.Д. (1889 г.), Лейста Э.Е. (1899-1917 гг.), впервые оценившего запасы территории в 15 млн. тонн, Лазарева П.П. (1918-1926 гг.), Губкина И.М. (1918-1926 гг.), именем которого назван первый открытый в 1931 году рудник, Архангельского А.Д., Козина К.П., Корбуша И.И. и Лучицкого В.И. (1926 г.).

В 1930-1941 гг. по решению Совета труда и Оборона СССР были возобновлены разведочные работы преимущественно на территории северо-восточной полосы у города Старый Оскол, где богатые железные руды и железистые кварциты залегают ближе всего к дневной поверхности. Уже к 1931 году почти одновременно недалеко от поселков Коробково, Салтыково, Лебеди, Волоконовка, Огибное и у г. Новый Оскол были вскрыты богатые железные руды с концентрацией железа 50-60% в виде горизонтальных залежей на крутопадающих пластах железистых кварцитов. Поисково-разведочные работы, геофизические, минералого-петрографические и другие исследования проводились под руководством Пятовского К.Я., Золозова Ф.С., Русиновича И.А., Свитальского Н.И., Дубровы Б.С., Наковникова Н.И., Гончарика Н.Ф., Успенского Н.И. и др. В те же годы Свитальским Н.И., Дубровой Б.С., Русиновичем И.А. и Золозовым Ф.С. была построена первая геологическая карта докембрия для всей территории Старо-Оскольского узла и выдвинута гипотеза о гипергенном генезисе богатых железных руд, образовавшихся, по их мнению, в результате сидеритизации приповерхностной части трещиноватых железистых кварцитов. По результатам гидрогеологических исследований было установлено, что богатые железные руды залегают в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях [62].

Показательным является тот факт, что открытые залежи богатых руд Коробковского месторождения спровоцировали в 1932 г. скорейшее промышленное освоение территории первым в КМА рудником им. Губкина., в следствие недоизученности геологических и гидрогеологических условий которого в 1936 году случилась авария, связанная с прорывом юрских рыхлых водонасыщенных глинистых песков и песчаных глин, обладающих плавучими свойствами и находящихся под гидростатическим давлением в 0,8 МПа, в горные выработки на горизонте 145 м. Водно-породная смесь проникла в насосную камеру, чем вывела из строя дренажную систему и вызвала быстрое затопление рудника с восстановлением уровней подземных вод практически до исходных статических величин.

Авария была ликвидирована осенью того же года. Она является напоминанием того, какой сложностью природных условий обладают месторождения КМА и того, какие требования

они предъявляют к достоверной оценке при проектировании и эксплуатации рудников, в частности, обрабатываемых подземным способом под неосушенными водоносными горизонтами.

После тяжелых военных лет, геологические работы возобновились с новой силой, приобретая более широкий размах. Начиная с 1947 по 1950-е годы усилия партий и экспедиций треста Курскгеология были сосредоточены на разведке железистых кварцитов в районах Салтыковского, Старо-Оскольского, Южно-Лебединского, Михайловского и Коробковского участков. Геологоразведочные работы треста на богатые руды, возглавляемые И.А. Русиновичем (1948— 1952 гг.) и С.И. Чайкиным (1953— 1954 гг.), имели второстепенное значение, однако, в рамках этих работ были открыты Михайловское (1950г.), Курбакинское (1954г.), Роговское (1949г.), Жигаевское (1950г.) месторождения.

Иными словами, широкий спектр поисково-разведочных работ в 40-х и 50-х годах XX века позволил уточнить геолого-гидрогеологические условия территории: впервые составлена геологическая карта докембрия всей КМА (Русинович И.А. 1958 г.), открыты новые месторождения богатых железных руд и железистых кварцитов, пересмотрен генезис богатых железных руд. На основании новых материалов бурения на докембрийские породы по 1100 скважинам Русинович И.А. в 1951 году делает заключение о том, что основным фактором формирования богатых руд является выщелачивание кремнезёма (зёрен кварца и других силикатов) из выходящих на поверхность железистых кварцитов в условиях континентального выветривания по латеритному типу, при этом карбонатизации и хлоритизации уже сформировавшихся кор выветривания отведена второстепенная роль наложенных процессов. Выветривание приповерхностной зоны происходило в интервал времени с конца протерозоя до середины девона — начала карбона, когда породы первого структурного этажа начали перекрываться старооскольскими пластами. Стоит отметить, что вопрос образования богатых железных руд гипергенного генезиса на сегодняшний день всё ещё остаётся предметом для дискуссии. Автору близок и будет взят в основу дальнейших исследований механизм образования по схеме, предложенной в 1951 г. Русиновичем И.А.

В первый послевоенный период геологоразведочных работ (1947-1953 гг.), целевыми участками были северная и северо-восточная часть территории КМА. При этом наиболее перспективным районом по мнению Дублянского А.А. и Русиновича И.А. являлся Белгородский (1948), ввиду более длительного периода выветривания в геологическом прошлом территории и наличию выявленного при геофизических гравиметрических и магнитометрических работах узла аномалий, характеризующего участок выхода под осадочные отложения кварцитов повышенной плотности и магнитной восприимчивости.

Несмотря на ранние оценки потенциала Белгородского железорудного района первые скважины, вскрывшие богатые железные руды, были пробурены в ходе геологических поисков Обоянской экспедицией на уголь (1953 г.). В разрезах пробуренных тогда скважин близ пос. Яковлево мощность вскрытых богатых руд с концентрацией 55-62% составила в среднем 210 м. Вскоре, после бурения поисковых скважин Обоянской партией было установлено, что столь мощное оруденение имеет распространение по всему Белгородскому району.

Сложные гидрогеологические условия Белгородского района, характеризующиеся наличием в толще осадочных пород фанерозоя напорных водоносных горизонтов с величинами избыточных напоров ~500 м, большая глубина залегания богатых железных руд (400-600 м) и авария на руднике им. Губкина, разрабатываемого в похожих горно-геологических условиях, породили недоверие у Министерства геологии к промышленному освоению богатых железных руд Яковлевского месторождения и переориентировали цели Министерства черной металлургии на освоение месторождений железистых кварцитов.

Ситуация изменилась в корне после завершения в 1955 г гидрогеологических и инженерно-геологических исследований на Лебединском и Михайловском месторождениях, по результатам которых Павловым Н.И. (1952 г) и Кулибабой Ф.В. (1955 г) было доказано, что мнение о невозможности экономически эффективной разработки богатых руд является ошибочным. Новый взгляд на потенциальную возможность использования колоссальных запасов богатых железных руд КМА спровоцировал новый этап поисково-разведочных работ, осуществляемых в 1955-1960 гг. Геологическим управлением центральных районов (ГУЦР) в составе Курской партии, Белгородской и Льговской железорудных экспедиций. В рамках этой инициативы была проведена оценка гидрогеологических и инженерно-геологических условий залегания богатых железных руд Яковлевского месторождения под руководством Саара А.А.

Новый этап геологоразведочных работ под руководством Доброхотова М.Н. (1955-1959 гг.) и Леоненко И.Н. (с 1958 г.) охватывал все ранее выявленные аномалии. По результатам геологоразведочных работ 1958-1963 годов были открыты Ольховское, Больше-Троицкое, Мелихово-Шебекинское, Гостищевское, Тетерино-Малиновское, Погромецкое и Чернянское месторождения, суммарные запасы которых вместе с Яковлевским месторождением составляют 95% всех богатых железных руд КМА.

В этот же период, как и предсказывалось Кротовым Б.П. и Русиновичем И.А. в 1951 г., при детальной разведке Яковлевского месторождения впервые в Белгородском районе были обнаружены бокситы мощностью 20-40 м в виде залежей на головах филлитовых сланцев, вмещающих железную формацию. Более того, на участке Яковлевского месторождения в 1965 г. бокситоносность железо-алюминиевых руд изучена до стадии предварительной

разведки. Позже, бокситовые породы и следы латеритного типа выветривания были обнаружены практически на всех месторождениях Белгородского района КМА.

Таким образом, целевым ориентиром активной деятельности Геологического управления центральных районов было глубокое изучение кор выветривания пород фундамента, что позволило совместно с исследованиями Академии наук СССР дать научное обоснование генезису богатых железных руд КМА путём развития ранее предложенной И.А. Русиновичем гипотезы о латеритном типе выветривания железистых кварцитов с последующим наложением вторичных процессов карбонатизации и хлоритизации. Среди выдающихся деятелей тех лет можно назвать Чайкина С.И., Никитину А.П., Калганова М.И., Калинина И.П., Гинзбурга И.И. и Рахманова В.П.

Геофизические и буровые работы под руководством Федюка В.И., Павловского В.И., Шмидта Н.Г., Копаева В.В. и Жаворонкина И.А. позволили построить карты гипсометрии поверхности рельефа пород фундамента, а также карт интенсивности магнитного и гравитационного полей, участков выходов рудоносных кварцитов повышенной плотности и магнитной восприимчивости. Вместе с тем, на уже открытых месторождениях Сааром А.А., Небосенко В.Ф., Смирновым Б.Н., Тимошенко И.И. и Кулибабой Ф.В. были возглавлены инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания, полностью обеспечивающие оценку как гидрогеологических и горно-экономических условий разработки, так и потенциал промышленного освоения разведанных запасов железных руд.

К этому периоду относится и строительство Южно-Коробковского рудника (1959 г), ввод в эксплуатацию Лебединского и Михайловского карьеров (1959 и 1960 гг. соответственно) и рассмотрение проектов строительства на их базе горно-обогатительных комбинатов, изначально позиционировавшихся для добычи богатых железных руд, начало строительства Стойленского рудника (1961 г.). Выполненные в начале 1960-х годов опытные водопонижения и оценка гидравлической связи нижнекаменноугольного водоносного горизонта с руднокристаллическим на Яковлевском месторождении послужили основанием для составления технического проекта разработки одноименного рудника (1964 г.). Растущий спрос на научно-техническую и проектную составляющую промышленного освоения месторождений бассейна КМА спровоцировало открытие в 1960 г. института Центрогиппроуда в г. Белгороде.

Накопленный научно-исследовательский материал к 1970-м годам был положен в основу картирования территории в масштабе 1:200000 и составления регионального взгляда на стратиграфию, тектонику, магматизм, гидрогеологию, минерагению, геохимию, метаморфизм и историю геологического развития КМА. С 1970-х годов по настоящее время территория КМА условно, без жесткой привязки к административным границам, подразделяется на Белгородский, Старо-Оскольский, Ново-Оскольский и Курско-Орловский районы (рис. 2.1.1).

На сегодняшний день территория КМА при её региональном административном рассмотрении включает в себя полностью Курскую область, Белгородскую область, западную часть Воронежской и Орловской областей, юго-восток Брянской и север Харьковской области.

Региональное обобщение геологической информации по КМА породило в период 1970-1980-х гг. новую волну исследований, основной целью которых на территории Белгородской области было решение как крупномасштабной геологической, аэроэкологической съемки и инженерно-геологического районирования территории (1:50000), так и тематических задач узкоспециализированного профиля: детальное расчленение и уточнение литологического строения осадочного чехла (Оферьев. А.Г., Кузнецов А.П., Иконников Н.Н., Иосифова Ю.И. и др.), датировка отложений, структурно-формационное зонирование и расчленение раннего докембрия Белгородского района, уточнение представлений о строении нижнепротерозойских структур – наиболее перспективных в отношении богатых железных руд и бокситовых образований.

В перечень тематических работ, в условиях бурного промышленного освоения месторождений КМА, вошли и гидрогеологические исследования, среди которых можно выделить гидрогеологические съемки Воронежской антеклизы масштаба 1:50000, составление гидрохимических карт, карт распределения эксплуатационных запасов подземных вод для целей хозяйственно-питьевого и технического водоснабжений территории, построение гидроизопьез и гидроизогипс гидрогеологических подразделений фанерозоя и криптозоя в естественном и техногенно-нарушенном гидродинамическом режиме (1974-1978 гг.). Увеличение потребностей инженерной деятельности человека вызвало рост разведочных работ для водоснабжения городов, поселков, промышленных узлов и конкретных месторождений (Белгород, Обоянь, Пристен, Строитель, Яковлевский ГОК и др. Вместе с тем, развитие получили и работы в области горнопромышленной гидрогеологии и экологии: изучались условия формирования водопритоков в горные выработки на месторождениях Белгородского района, готовые к отработке подземным способом, а также составлялись прогнозы изменения гидродинамического и гидрохимического режима подземных вод при воздействии инженерной деятельности человека.

На основе ранее проведенных гидрогеологических и инженерно-геологических исследований в 1970-м году институтом ВИОГЕМ разработан проект осушения Яковлевского рудника, в котором обоснована комбинированная система осушения с общим забором системой дренажа $\sim 3000 \text{ м}^3/\text{час}$ как 47 водопонижающими скважинами с поверхности (на нижнекаменноугольный водоносный горизонт), так и дренажными горными выработками с системой узлов наклонных дренажных скважин на горизонтах -300 м и -400 м.

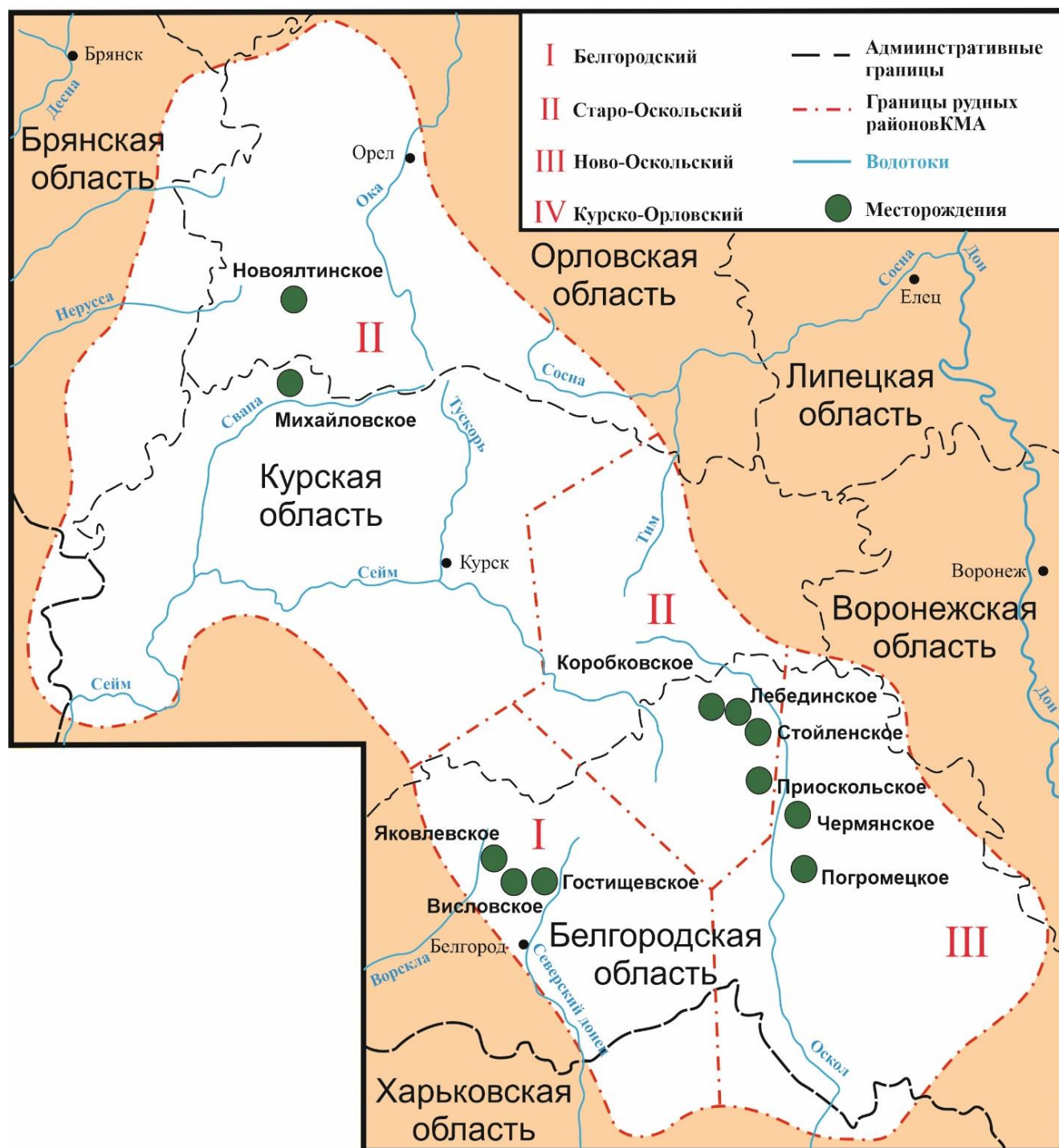


Рисунок 1.1 – Схема районирования территории КМА (по материалам Леоненко И.Н. [30])

В период 1972-1988 гг. активно уточнялись в ходе доразведки геолого-гидрогеологические условия первоочередного участка отработки богатых железных руд, корректировались проектные решения по созданию дренажной системы рудника с учетом новых прогнозов и условий формирования водопритоков к горным выработкам Яковлевского месторождения. На основе полученных результатов в 1986 г. институтом ВИОГЕМ представлен новый технический проект осушения первоочередного участка отработки производительностью 500 тыс.тонн/год сырой руды и водопритоком к системе дренажа $\sim 2500 \text{ м}^3/\text{час}$, в котором

количество поверхностных водопонижающих скважин на нижнекаменноугольный водоносный горизонт сократилось до 30 шт., а снятие остаточных напоров до отметки -300 м предполагалось с помощью восстающих с горизонта -425 м скважин.

Через 2 года после внедрения проекта, институтом ВИОГЕМ совместно с НТЦ НОВОТЕК и геологической службой Яковлевского рудника начинаются опытные и опытно-производственные понижения (1988-1992 гг.), результаты которых указали на слабую гидравлическую связь между нижнекаменноугольным водоносным горизонтом и руднокристаллическим комплексом и позволили с помощью решения обратной задачи на трёхслойной геофильтрационной численной модели определить средний коэффициент фильтрации разделяющего слоя (прослоев углистых глин и переотложенных руд в нижней части нижнекаменноугольного водоносного горизонта), который составил $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут.

В период опытно-производственных работ был также получен опыт строительства и эксплуатации узлов наклонно-восстающих дренажных скважин в руднокристаллическом массиве пород при условии наличия остаточных напоров как в руднокристаллическом комплексе, так и нижнекаменноугольном водоносном горизонте. Совокупным результатом опытно-производственных работ стало решение от 10.02.1992 об отключении поверхностных водопонижающих скважин и инициация в 1994-1995 гг. НТЦ НОВОТЕК работ по совершенствованию системы осушения Яковлевского рудника на основе анализа режимных наблюдений предыдущих периодов ведения мониторинга. Согласно новой принятой подземной системе дренажа общий прогнозный водоприток обеспечивается с помощью суммарного дебита самоизлива от узлов наклонно-восстающих скважин на горизонте -425 м и рассредоточенной разгрузки подземных вод непосредственно из руднокристаллического водоносного комплекса.

Стоит отметить, что с 1992-1995 гг. переход к капиталистической модели экономики обусловил дискретный характер дальнейшего освоения территории Белгородского района КМА, который характеризовался разведкой, разработкой и принятием конкретных проектных решений для добычи железных руд отдельных месторождений, при этом региональные работы приобрели подчинённое значение и существенно сократили свои объёмы. Научным изучением режима подземных вод месторождений КМА в целом занимались такие отечественные ученые, как В.А. Мироненко, Е.П. Писанец, Ю.А. Норватов, А.Т. Бобрышев, Б.Н. Смирнов.

Условиям формирования техногенного режима подземных вод, разработке эффективных методик разведки месторождений КМА, обоснованию параметрической базы для безопасной отработки руд, особенностям расчетов устойчивости открытых и подземных выработок, коррозии и биокоррозии крепей, изучению горнодинамических явлений посвящено множество научных трудов как вышеперечисленных ученых, так и многих других.

Одними из предопределяющих проектных решений в общей концепции разработки Яковлевского месторождения являются работы НТЦ НОВОТЕК (2004 г.) и института «Центрогипроруда» (2006 г.), в которых обоснована и принята безопасная глубина ведения горных работ под неосушенным нижнекаменноугольным водоносным горизонтом – 65 м при коэффициенте запаса 1,25, и нисходящая послоевая система разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями при сохранении подземной системы осушения наклонно-восстающими дренажными скважинами с гор. -425 м в условиях недренированных напоров нижнекаменноугольного водоносного горизонта (НВГ).

Проект II очереди строительства Яковлевского рудника на 4,5 млн тонн сырой руды в год, разработанный институтом «Центрогипроруда» в 2011 году, и корректировка проекта в 2018 году ООО «СПБ-Гипрошахт» предусматривает сохранение дренажной системы I очереди строительства рудника без изменений.

Вместе с тем, с начала ввода рудника в эксплуатацию (2007 г.) был проведён широкий спектр научных исследований под руководством Дашко Р.Э., Трушко В.Л., Протосени А.Г., Петрова Н.С, Гусева В.Н, Макарова А.Б. и др., направленных на установление особенностей деформирования рудовмещающих пород при разной величине недозаклада выработанного пространства и способа крепления, выявление закономерностей формирования зон предельного равновесия в кровле выработок, разработку принципов организации геомеханического мониторинга и фиксации деформаций массива, геомеханическому обоснованию безопасных условий выемки богатых железных руд [63-70].

Также была проведена количественная оценка условий, при которых возможен прорыв вод нижнекаменноугольного горизонта в горные выработки 0-го слоя, установлены критерии безопасной величины максимально допустимого напора на кровле водозащитной толщи и источники поступления подземных вод в рудник [71, 72]. При этом отдельное внимание уделяется требованиям к качеству осушения целика во избежание вторичного увлажнения БЖР и ухудшения их прочностных параметров под действием агрессивных к карбонатам вод нижнекаменноугольного водоносного горизонта [46, 73].

Часть исследований посвящена гидрогеологическому и биологическому мониторингу, его потенциалу в условиях Яковлевского рудника, постановке и особенностям проведения натурных наблюдений [74-78]. Ведение гидрохимического мониторинга в пределах некоторых участков указывает на прямую гидравлическую связь нижнекаменноугольного водоносного горизонта с горизонтом -425 м, выявленную по установленным тестовым элементам: сероводороду, фторидам, хлоридам, гидрокарбонатам и общей минерализации [72].

1.6 Выводы по I главе

На основании вышесказанного об актуальности исследования, состоянии изученности вопроса, приоритетных научных направлениях в минерально-сырьевой отрасли, а также анализа источников с результатами зарубежных и отечественных исследований по данной тематике, среди которых диссертации на соискание степени кандидата и доктора наук, патенты на изобретения методик и способов защиты горных выработок при их разработке под водными объектами и водонасыщенными горными породами, нормативные и методические указания для проектирования и разработки месторождений полезных ископаемых, научные статьи, монографии и высказывания отечественных и зарубежных ведущих специалистов в данной отрасли в целом и касательно Яковлевского месторождения в частности, можно сформулировать следующие выводы:

1. Актуальность вопроса ведения горных работ под водными объектами в рамках эффективного освоения недр и создания безопасных условий отработки месторождений со второй половины XX века по настоящее время испытывает рост и обсуждается на докладах научного сообщества и правительственных структур, что связано с тенденцией в минерально-сырьевом комплексе к усилению техногенной нагрузки на недра, выработкой легкодоступных запасов, увеличением глубин отработки полезных ископаемых и переходом к более сложным гидрогеомеханическим условиям;

2. Для рудных месторождений, отрабатываемых под неосушенными водоносными горизонтами, целесообразным является реализация подхода к их проектированию с точки зрения техногенного увеличения проницаемости пород водозащитной толщи в процессе выемки полезного ископаемого. Игнорирование данного фактора может приводить к существенным ошибкам в оценке водопритока к горным выработкам, в особенности на заключительных этапах отработки месторождений, когда техногенная нарушенность целика становится максимальной;

3. К настоящему времени не предложено единой теоретической модели, позволяющей прогнозировать изменение проницаемости поровой среды, сложенной дисперсными несвязными породами, при её деформировании, что повышает актуальность использования эмпирических зависимостей для прогнозирования водопритока через водозащитные толщи, сложенными данным типом горных пород. Это обстоятельство также требует разработки методических подходов для получения искомых функциональных зависимостей;

4. Высоким потенциалом для повышения безопасности ведения горных работ под водными объектами обладает развитие концепции комплексного гидрогеологического мониторинга

путем фиксации и анализа гидрохимических и гидродинамических показателей подземных вод с использованием современного автоматизированного оборудования;

5. История изучения геолого-гидрогеологических условий КМА и Яковлевского месторождения в частности насчитывает более 100 лет. За этот период было проведено множество научно-производственных исследований. Были изучены литотипы и петротипы, участвующие в строении месторождения, определены физико-механические свойства пород и условия их снижения при увеличении влажности и микробной пораженности. Выявлены и систематизированы инженерно-геологические процессы, а также критерии их возникновения и интенсификации; установлены критерии возникновения наиболее опасного из них – прорыва подземных вод из НВГ в горные выработки 0-го слоя (-370 гор.);

6. Недоизученными в пределах Яковлевского месторождения остаются вопросы прогнозирования изменения проницаемости водозащитной толщи при её подработке, которая определяет водоприток подземных вод к зоне ведения очистных работ. Факт перетекания подземных вод из НВГ ранее устанавливался лишь качественно: оценка балансовых составляющих формирования водопритока в рудник в процессе его строительства и развития не проводилась. Следовательно, получение функциональной зависимости водопритока к очистному пространству из НВГ от параметров подработки ВЗТ обладает высокой актуальностью. Вместе с тем, дальнейшая разработка месторождения в пределах первоочередного участка и развитие горных работ на прилегающих требует научно-практического обоснования постановки и развития положений комплексного гидрогеологического мониторинга.

ГЛАВА II МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Используемые материалы

Качество и количество получаемых при проведении любого исследования данных во многом будет определяться исходной информацией, на основе которой выполняется работа.

В основе данной диссертационной работы были положены результаты геологоразведочных работ, выполненных Белгородской экспедицией на Яковлевском месторождении Белгородского железорудного района 1956-1962 гг., а также материалы о доразведке Яковлевского месторождения в период с 1982 по 1986 гг., в которых подробно отражены геологическое строение осадочного чехла фанерозоя и докембрийских пород фундамента по нескольким профилям скважин, физико-механические свойства, генезис, минералогический и химический состав богатых железных руд, сведения об орогидрографии [78-82].

Представления о естественных гидрогеологических условиях основаны на комплексных гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях 1956-1958 гг., под руководством А.А. Саара, результатах гидрогеологической доразведки месторождения Белгородской геологоразведочной экспедицией в 1986 г. по 9 разведочных скважинам. Техногенно изменённый режим подземных вод изучался на основе опытно-производственных понижений с 1988 по 1991 гг., материалах наблюдений мониторинговой службы Яковлевского месторождения за уровнями подземных вод и их химическим составом, расходами узлов наклонных дренажных скважин, производительностью рудничного водоотлива за последние 30 лет и собранных автором в ходе полевых работ на месторождении сведений о распределении участков водопроявлений в горные выработки, минерализации и расходах рудничных вод на ключевых участках водосборной системы рудника, замерах дебитов дренажных скважин и минерализации дренируемых ими вод, интенсивности проявления гидрогеомеханических процессов [82, 83, 84].

Детальнее, использованные в работе материалы отражены в разделах, посвященных геологическому и гидрогеологическому строению месторождения.

2.1.1 Физико-географический очерк

В административном отношении Яковлевское месторождение расположено близ одноименного поселка в Белгородской области, в 30 километрах северо-западнее г. Белгород. В северо-западном углу рассматриваемый район исследований контролируется поселком Верхопенье, в юго-западном – с. Драгунское, в юго-восточном – с. Вислое, в северо-восточном – с. Беленихино (рис. 2.1).

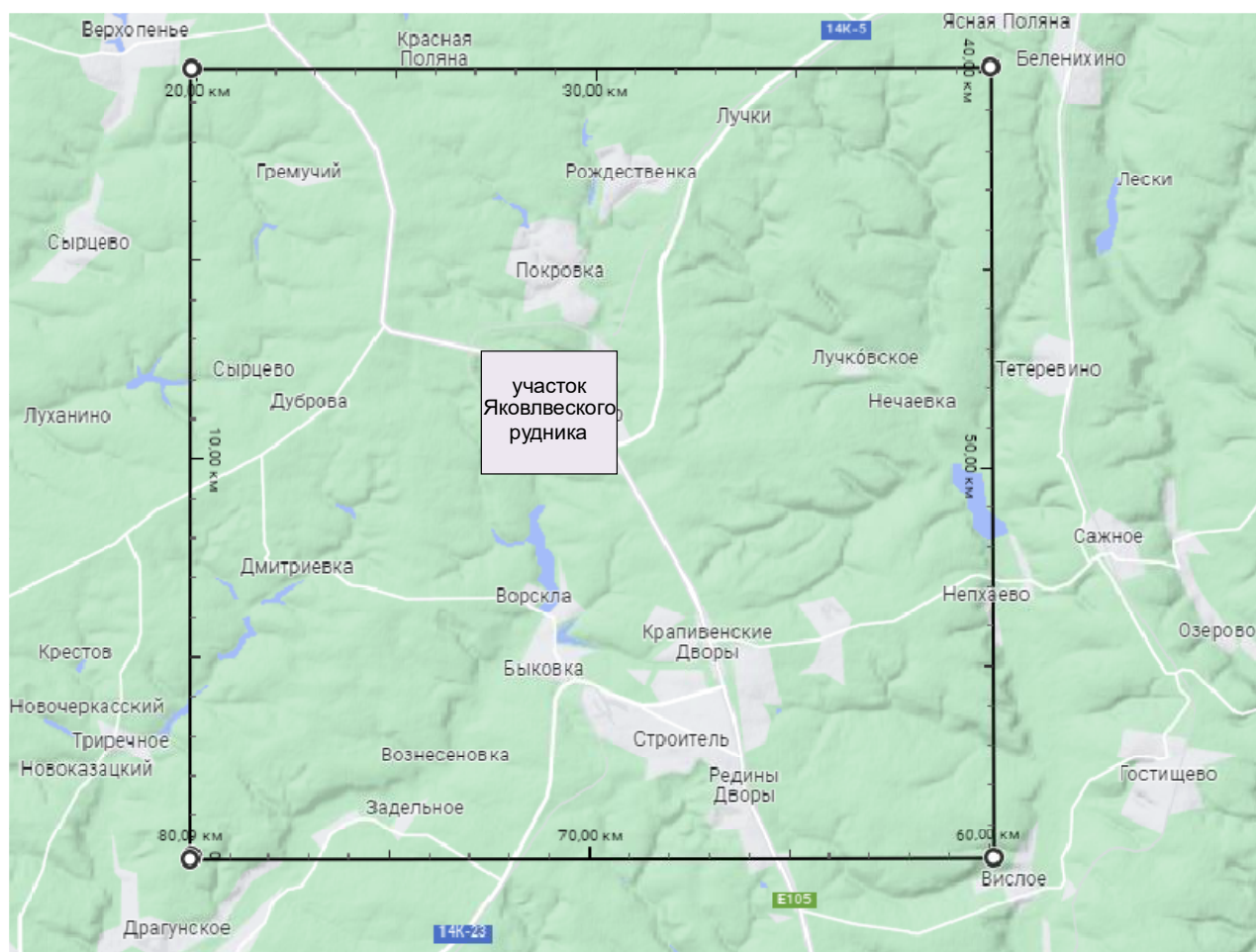


Рисунок 2.1 – Административное расположение района исследований

Рельеф района во многом обусловлен принадлежностью к пологому юго-западному крылу Воронежской антеклизы и может быть охарактеризован как волнистая эрозионная равнина, расчленённая речными долинами и сухими балками. Густота овражно-балочной сети составляет $1,6 \text{ км/км}^2$. Максимальные абсолютные отметки достигают 230 м, минимальные в руслах рек – 190 м., в среднем перепады высот не превышают 30 м.

Гидрография. Сведения о гидрографии района работ были получены по результатам гидрометеорологических изысканий 2010 года для II очереди строительства Яковлевского рудника [85]. На рассматриваемой территории в 5 км. севернее рудника находится исток реки Ворсклы, принадлежащей к бассейну р. Днепр. Вблизи поселка Яковлево на р. Ворскла с 1958 по 1998 гг. функционировал стационарный гидрологический пост, на котором в течение 39 лет фиксировались основные гидрологические характеристики. Водосборная площадь охватывает центральную и южную часть участка, а на гидропосте составляет 55 км^2 . Русло реки извилистое с множеством меандр и стариц. Долина реки имеет широкую пойму без резко выраженных уступов. Средневзвешенный уклон составляет 0,0006 %. Ширина русла в выделенном районе колеблется от 2 до 5 метров (40 м в зоне запруды у с. Крапивное), а глубина от 0,6 до 2 м. Скорость течения в среднем равна 0,15-0,2 м/с. Река имеет четкий период весеннего половодья,

начинающийся в последней декаде марта и заключающийся в подъеме уровня в среднем на 1-3 м. Максимально зафиксированный подъем уровня на гидропосте у п. Яковлево в 1971 г. составляет 236 см. Средняя продолжительность половодья 42 дня. Распределение расхода р. Ворскла по сезонам неоднородно и показано в таблице 2.1., в то время как среднегодовой расход составляет 0,22 м³/с.

Таблица 2.1 – Средние месячные расходы воды в р. Ворскла, м³/с

Месяц											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,11	0,19	0,62	0,76	0,15	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,16	0,15

Ниже будет показано, что наличие гидросети в виде р. Ворскла и её притоков не оказывает значимого влияния на формирование водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника. В хозяйственных целях река используется для сброса вод промышленными предприятиями и в рекреационных целях.

Климат района относится к умеренно-континентальному типу (II климатический район). За последние 37 лет метеорологические наблюдения проводились по авиационной метеорологической станции «АМСГ Белгород», располагающейся в непосредственной близости от юго-восточной границы рассматриваемого района.

Среднегодовая температура воздуха составляет 6,4 °С. Среднемесячная температура приведена в таблице 2.2. Продолжительность периода с положительной среднесуточной температурой составляет 225 дней [85].

Таблица 2.2 – Среднемесячная температура воздуха, °С.

Месяц											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-8,5	-6,4	-2,5	7,5	14,6	17,9	19,9	18,7	12,9	6,4	0,3	-4,5

Район работ относится к зоне умеренного увлажнения, годовая сумма осадков за год составляет 553 мм., в то время как 2/3 из них приходятся на дожди и только 1/3 в виде снега. Среднемесячные значения приводятся в таблице 2.3. Стоит отметить, что по данным гидрометеорологических изысканий при строительстве объектов в пределах горного отвода Яковлевского рудника (2010 г.), естественная величина инфильтрации составляет 80 мм/год – 15 % от величины среднегодовых осадков. Дно русла песчаное с проницаемостью, сопоставимой с вмещающими породами [85].

Таблица 2.3 – Среднемесячное количество осадков с поправкой на смачивание, мм

Месяц											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
36	32	34	41	47	63	69	56	40	46	46	43

Высота снежного покрова в среднем достигает 24 см, а устойчивый покров сохраняется с последней декады ноября до конца марта. Средняя относительная влажность воздуха составляет 75% и не выходит за пределы 61-88 % [85].

В **экономическом** отношении район принадлежит к числу промышленно-сельскохозяйственных. В г. Строитель расположены предприятия по переработке производству, добыче и переработке строительных материалов (мел, песок, керамзитные глины и др.). В пределах рассматриваемой территории находится уникальное по запасам богатых железных руд Яковлевское месторождение и его горно-обогатительный комбинат.

2.1.2 Геологическое строение Яковлевского месторождения

Как отмечалось ранее, геологическое строение района работ изучалось по материалам геологоразведочных работ при составлении листа государственной геологической карты М 1:200 000 М-37-VII и результатам геологических работ, нацеленных на разведку и доразведку месторождений Белгородского железорудного узла.

В диссертационной работе за основу стратиграфической шкалы принята утвержденная для листа М-37-VII (Обоянь) в 2013 г. система наименований [86]. Фактический материал о строении района был взят по профилям геологоразведочных скважин, пробуренных в период с 1956 по 1987 гг (рис. 2.2) [81, 82].

В геологическом строении района исследований участвуют образования фанерозойского осадочного чехла и докембрийские породы фундамента. Фундамент представлен породами архея и нижнего карелия. Осадочный чехол сложен накоплениями нижнекаменноугольного, юрского, мелового, палеогенового и четвертичного возраста мощностью до 550 м.

Верхний Архей.

Ахейский комплекс установлен в районе месторождения к юго-западу и северо-востоку от очистных выработок, где приурочен к катаклазированным плагиогранитам, аркозовым метапесчаникам, микрокристаллическим филлитам, железистым кварцитам и другим разностям (рис. 2.3).

Михайловская серия (AR_2mh) включает в себя нижнюю (александровскую) и верхнюю (лебединскую) свиты.

Александровская свита (AR_{2al}) распространена в рудных полосах среди метагипербазитов. Подошва свиты не вскрыта. Разрез представлен метаандезитами, метаперидотитами и metabазальтами. В верхней части метатерригенно-вулканические породы постепенно сменяются метатерригенными. Общая мощность свиты – не менее 100 м.

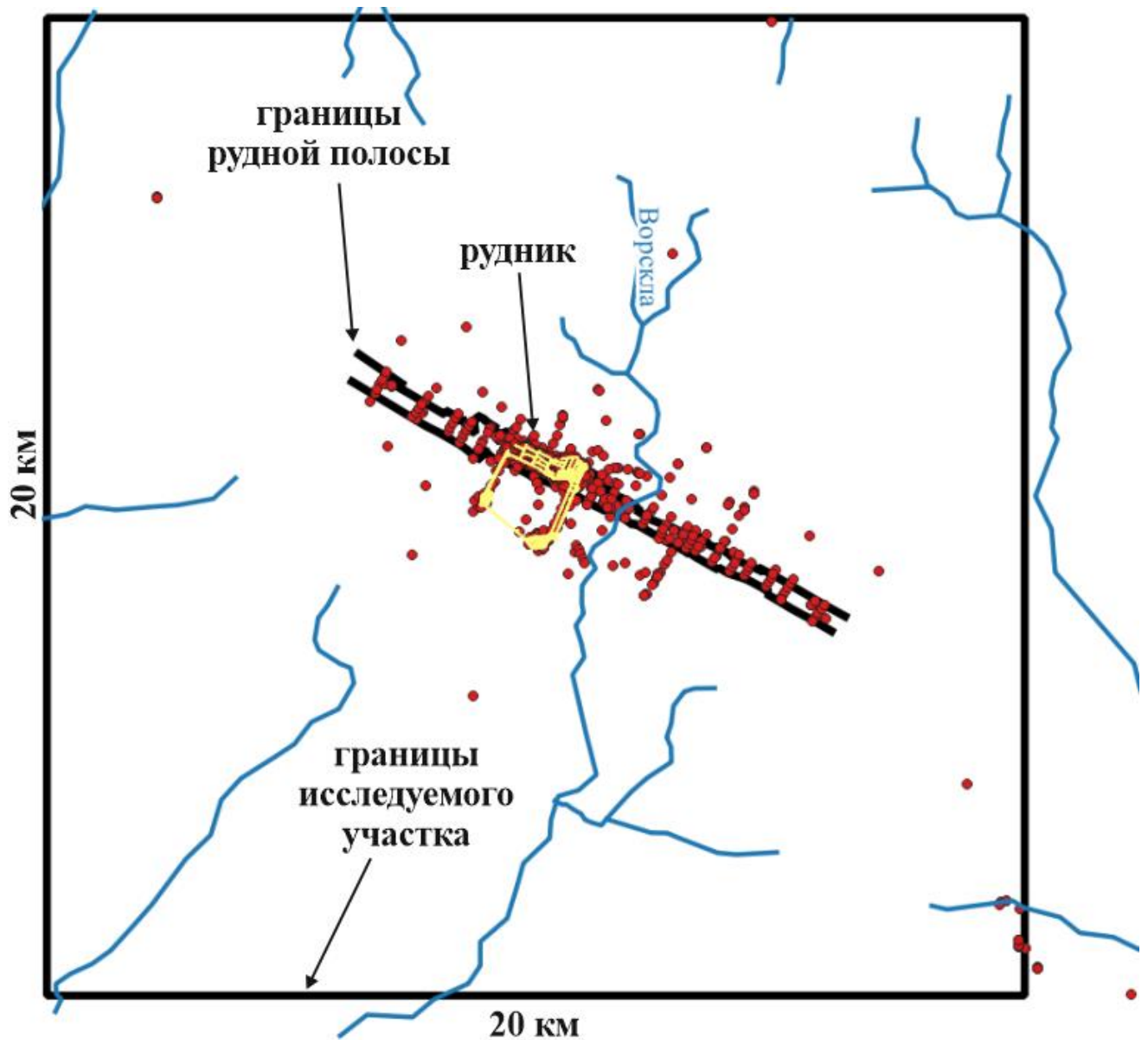
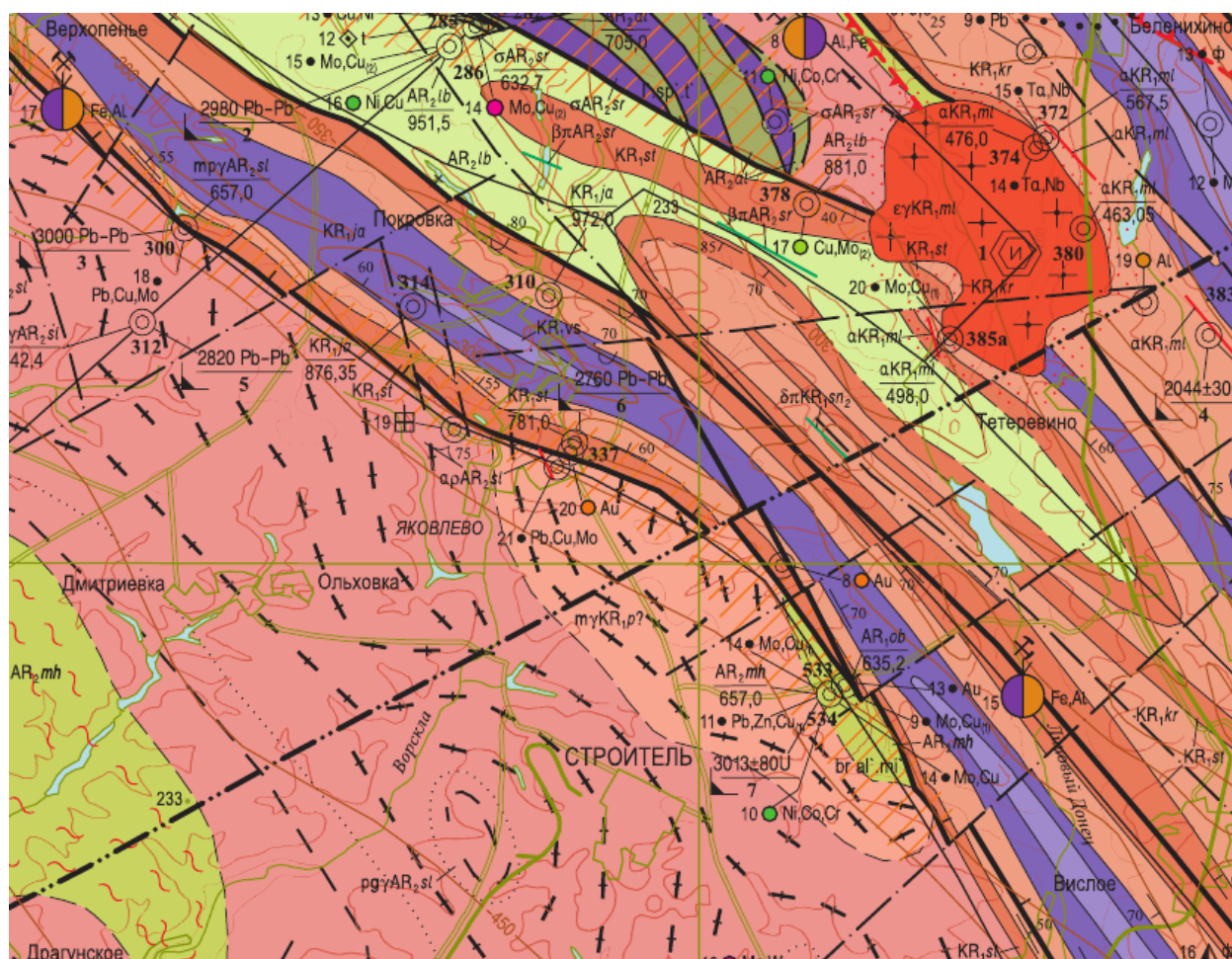


Рисунок 2.2 – Обобщенный фонд геологоразведочных скважин в районе участка исследований по результатам геологоразведочных работ в период 1956-1986 гг. (составлено автором)

Лебединская свита (AR_{2lb}) имеет ритмичное строение. Ритмы различных порядков проявляются в тонком, линзовидно-параллельном переслаивании сланцев и метаалевролитов с прослоями тонко-мелкозернистых метапесчаников. Общая мощность – не менее 100 м.

Нижний карелий.

Курская серия (KR_{1ks}) расчленена на стойленскую и коробковскую свиты. В ее составе принимают участие метапесчаники, сланцы и толща переслаивания железистых кварцитов и сланцев. Породы данной серии окаймляют рудную полосу являясь для неё вмещающими породами, с углами падения пород от 40° до 85° в северо-восточную сторону. Общая мощность серии 50 м и более.



AR ₂ lb	AR ₂ mh
AR ₂ al	

Михайловская серия
Лебединская свита. Метапесчаники, сланцы кварц-серицит-хлоритовые, кварц-биотитовые, метаалевролиты (до 350 м)

KR ₁ kr	KR ₁ ks
KR ₁ st	

Александровская свита. Метаконатииты, метабазальты, метаандезиты, сланцы эпидот-хлорит-биотитовые, хлорит-актинолит-биотитовые, кварц-хлорит-серицит-углеродистые, метаалевролиты (600 м). **Рудоносные для сульфидно-никелевого и никелево-силикатного типов оруденения; вмещают медно-молибденовое, молибденное и золотое**
Коробковская свита. Переслаивание железистых кварцитов (железнослюдково-магнетитовых, магнетитовых, силикат-магнетитовых, карбонат-магнетитовых) и сланцев (углеродистых, кварц-серицитовых, кварц карбонат-серицитовых) (до 1300 м). **Вмещают полиметаллическое оруденение**

KR ₁ šč	KR ₁ os
KR ₁ vs	
KR ₁ ja	

Курская серия
Стойленская свита. Сланцы кварц-серицит-биотитовые, хлорит-биотитовые, углеродистые, метаалевролиты, метапесчаники, метагравелиты, метаконгломераты (до 450 м). **Вмещают золотое и полиметаллическое оруденения**
Щелковская толща. Метапесчаники с прослоями метагравелитов, метаконгломератов, сланцы кварц-серицитовые, известняки и доломиты (500 м)

Оскольская серия
Висловская толща. Сланцы кварц-слюдистые, углеродистые, кварц-хлоритовые с карбонатом, метаалевролиты, метапесчаники, линзы и пакки известняков и доломитов, метаконгломератов, метагравелитов (2 пакки до 325 м). **Вмещают полиметаллическое, молибденное оруденение; метатерригенно-карбонатные разрезы - рудоносные для осадочно-метаморфогенных фосфоритов**

Яковлевская свита. Сланцы кварц-слюдистые, углеродистые, метапесчаники, прослои доломитов, железистых кварцитов, метаконгломератов, метагравелитов (2 пакки до 460 м). **Вмещают полиметаллическое оруденение**

2	+	3	Y	Y
1	—	2	+	+

Интрузивные породы: 1 – граниты, 2 – граниты субщелочные, 3 – сиениты

Метаморфические кварц породы: 1 – гранит-мигматиты, гранито-гнейсы; 2 – метатектит-граниты

Рисунок 2.3 – Фрагмент карты докембрийских пород ГК М 1:200 000 листа М-37-VII (Обоянь) [86]

Оскольская серия (KR_{10s}) состоит из яковлевской свиты, висловской и щелоковской толщ, имеет, преимущественно, карбонатно-терригенный состав и содержит прослои кластогенных железистых кварцитов.

Яковлевская сита (KR_{1ja}) представляет собой продукты самостоятельной локальной седиментации в пределах поднятий и прогибов местного мелководного внутриконтинентального палеобассейна.

Распространена она в виде линейных структур в центральном (Яковлевская рудная полоса) и северо-восточном (Покровская рудная полоса) участках рассматриваемой области, породы которой имеют юго-восточное простираие (рис. 2.3). Свита сложена железистыми кварцитами и продуктами их выветривания, реже кварц-слюдистыми сланцами и карбонатными образованиями общей мощностью до 500 м. Контакт с вмещающими коробковской и стойленской свитами согласный и с размывом соответственно. Породы свиты являются сильно выветрелыми в верхней части, метаморфизованными в зеленосланцевой фации, особенно в северо-восточном борту, а также замещенными гипергенными минералами в условиях наложенных довизейских процессов карбонатизации и хлоритизации в прикровельной части разреза.

Щелоковская (KR_{1šš}) и висловская (KR_{1vs}) толщи в пределах рассматриваемого участка имеют ограниченное распространение, приуроченное к ядрам синклиналиных структур. Породы представлены кварц-серецитовыми сланцами, метапесчаниками, метаалевролитами, метаконгломератами и метагравелитами с прослоями известняков и доломитов в верхней части разреза. На территории Яковлевского месторождения щелоковская толща не встречена и распространена лишь в северо-восточном углу рассматриваемого участка, а висловская слагает локальное 5-ти километровое по простираию синклинальное ядро в породах яковлевской свиты мощностью до 500 м.

Довизейские коры выветривания (KR₁-C₁).

В пределах рассматриваемого участка повсеместно распространены на породах кристаллического фундамента и имеют высокую зрелость конечных продуктов. Как правило, площадные коры обладают существенно меньшей мощностью в отличие от линейно-трещинного типа (Яковлевская и Покровская полосы).

Выветрелая зона (богатых железных руд) в главной своей части представлена рыхлыми, тонкопористыми алевритами и пылеватыми песками (реже песчаниками) железнослудково-мартитового и мартит-гидрогематитового состава, развивающимся по породам михайловской, курской и оскольской серий. Мощность руд (кор выветривания) Яковлевского месторождения варьирует от 5 до 350 м. В нижней части богатые железные руды рудной полосы сменяются окисленными и полуокисленными кварцитами, формируя буферную зону порядка 100 м. В

минералогическом составе руд принимают участие: мартит, железная слюдка, магнетит, сидерит, дисперсный гематит, гидрогематит, гидрогетит, гетит, пирит и др. При этом рудообразующими минералами являются мартит, железная слюдка, дисперсный гематит и гидрогематит [81].

По минералогическому составу среди руд Яковлевского месторождения выделяются:

1. железнослюdkово-мартитовые и мартито-железнослюdkовые руды;
2. мартито-гидрогематитовые и гидрогетитовые руды;
3. карбонатизированные железнослюdkово-мартитовые, гидрогематитовые и гидрогетитовые руды;
4. переотложенные конгломерато-брекчевидные руды.

В своем развитии определённое место занимают лишь последние два типа, сконцентрированные в прикровельной части свиты, на границе с нижнекаменноугольными отложениями. Первые два типа, составляющие основной объем разрабатываемых на Яковлевском месторождении руд, часто переслаиваются между собой и не формируют конкретных структур. Для них не характерно наличие вторичных гипергенных карбонатов и хлоритов.

Зона карбонатизации приурочена строго к верхней части свиты в диапазоне мощностей 5-110 м. Образованная в ходе наложенного гипергенного процесса карбонатизации, эта зона является покровом выветрелой части массива и характеризуется развитием цементационного сидерита в поровом пространстве богатых железных руд. Кальцит имеет подчиненное значение так как 95% карбонатов представлены сидеритом. Более того, на некоторых интервалах карбонатами замещены до 60-70 % материнских пород. Зона не имеет выдержанной мощности и изменяется в широких пределах, как правило увеличиваясь от лежачего к висячему (северо-восточному блоку). Карбонатизированные руды имеют важное значение как с точки зрения геологической стратификации, так и гидрогеомеханической схематизации условий разработки Яковлевского месторождения. На основе результатов бурения геологоразведочных профилей в 1956-1958 гг. более подробно физико-механическими свойствами карбонатизированных руд и особенностями их распространения занимался А.Н. Цибизов. Исходя из изученных интервалов распространения карбонатизированных руд, можно построить схему изомощностей их распространения (рис. 2.4) [81].

Зона хлоритизации расположена под зоной карбонатизации и предшествует ей в геологическом времени. Её мощность не превышает 40 м, в среднем 5-10 м. Характерной особенностью зоны хлоритизации является заполнение порового пространства вторичным хлоритом, в результате чего руды приобретают слабосцементированное сложение.

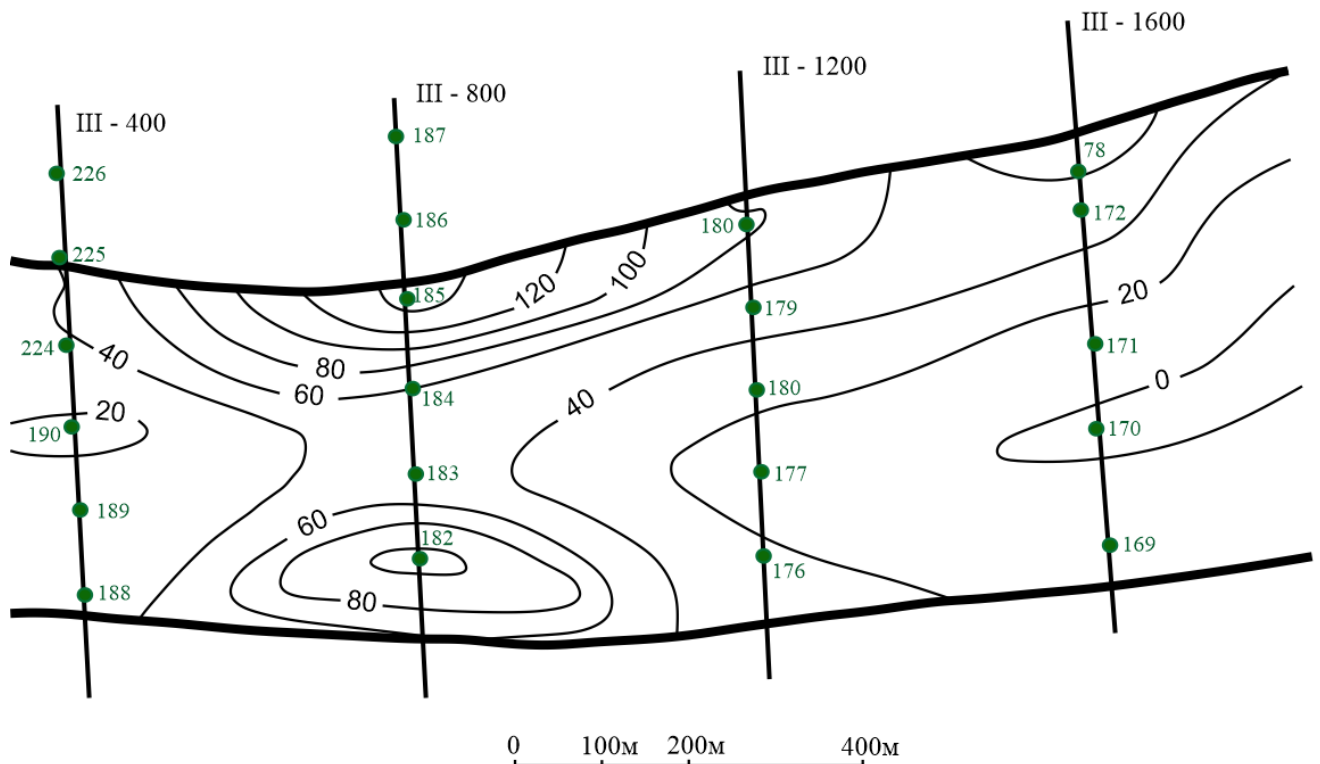


Рисунок 2.4 – Схема изомощностей распространения карбонатизированных руд в кровле фундамента по результатам геологоразведочных работ 1956-1987 гг. [86] (составлено автором)

Фанерозой представлен отложениями каменноугольной, юрской, меловой, палеогеновой и четвертичной систем (рис. 2.5 и 2.6).

Каменноугольная система.

Породы карбона имеют повсеместное распространение на территории исследований и представлены терригенно-карбонатным комплексом. Мощность отложений плавно увеличивается на юго-запад ввиду погружения поверхности кристаллического фундамента в сторону Днепровско-Донецкой впадины. В пределах участка нижнекаменноугольный отдел представлен визейским и серпуховским ярусами. На геологическом разрезе видно, что на рассматриваемой территории ярусы включают в себя семь свит (рис. 2.5 и 2.6).

Бобриковская свита (C_{1bb}) развита локально и состоит из кластогенных пород, продуктов переотложенных кор выветривания кристаллических пород, глин. Мощность свиты до 10 м.

Алексинская свита (C_{1al}) развита повсеместно. Сложена глинами углистыми с прослоями алевролитов и углей, криноидными и стигмариевыми известняками с прослоями известковых глин, мергелями. Мощность свиты колеблется от 10 до 20 м.

Михайловская свита (C_{1mh}) залегает на алексинской свите с согласно и почти повсеместно перекрывает выступы пород фундамента. По большей части сложена известняками, а также углисто-глинистыми и песчаными породами. Мощность свиты до 20 м.

Веневская свита (C_{1vn}) характеризуется повсеместным распространением. Сложена переслаивающимися карбонатными и терригенными породами. Карбонатная составляющая представлена известняками и мергелями. Известняки часто окремнены и содержат обильные растительные и фаунистические остатки. Глины темно-серые, известковистые и тонкослоистые бейделлитового и монтмориллонитового состава. Нижняя граница проводится по кровле ризоидных известняков михайловского горизонта. Мощность колеблется от 15 м.

Тарусская свита (C_{1tr}) сложена глинами и алевролитами, переслаивающимися с известняками. Бейделлит-монтмориллонитовые глины чаще всего серые, плитчатые, известковистые с редкими растительными остатками. Известняки светлые и темно-серые, перекристаллизованные, с фаунистическими остатками фораминифер и криноидей. Мощность свиты колеблется от 10 до 30 метров.

Стешевская свита (C_{1st}) представлена известняком с глинистыми и доломитными прослоями. Породы частично доломитизированы, в меньшей степени окремнены. Глины имеют светло-серую окраску и бейделлит-монтмориллонитовый минеральный состав. Мощность варьируется в относительно широком диапазоне, так как свита локально выклинивается, и в среднем достигает 10 м на южной границе.

Протвинская свита (C_{1pr}) имеет ограниченное распространение и представлена белыми и светло-серыми, гранулированными и перекристаллизованными известняками. Доломитизированные известняки и доломиты имеют подчиненное распространение. В незначительном объеме присутствуют прослои алевролитистых кварцевых песчаников, олигомиктовых слоистых алевроитов и гидрослюдистых аргиллитов. Нижняя граница контролируется стешевсковским горизонтом. Верхняя граница размыта. Мощность свиты в пределах рассматриваемого участка не более 10 м.

В целом, общая мощность нижнекаменноугольных накоплений на рассматриваемом участке увеличивается с северо-востока на юго-запад от 35 м до 145 м. Литологический состав во многом схож между каждой свитой, однако, количество глинистых прослоев уменьшается от подошвы к кровле, а прослои бурых углей встречаются только в понижениях приконтактной с фундаментом зоны. Угли и глины имеют линзовидные тела, часто не соприкасающиеся между собой, что обуславливает «сеточное» строение каменноугольной толщи в разрезе.

Юрская система.

Представлена средним и верхним отделами. Юрские накопления на рассматриваемом участке распространены повсеместно, со стратиграфическим перерывом и угловым несогласием залегают на породах карбона. Не имеют выхода на дневную поверхность. В структурном отношении породы являются полого погружающейся в юго-западном направлении моноклиналию. Представлены терригенными разностями лагунных и континентальных фаций.

Верхний подъярус байосского яруса – нижний подъярус батского яруса.

Пеновская, раkitненская и безгинская свиты (J_{2pn+bz}) распространены повсеместно. В низах разреза залегает пеновская свита, сложенная глинами голубовато-серыми, с конкрециями сидерита. Ракитненская свита, залегающая выше, представлена тонкозернистым песком, с редкими растительными остатками. Завершает разрез безгинская свита, сложенная глинами светло-серыми с голубоватым оттенком, с конкрециями пирита и сидерита и обугленными растительными остатками. Общая мощность отложений не более 40 м.

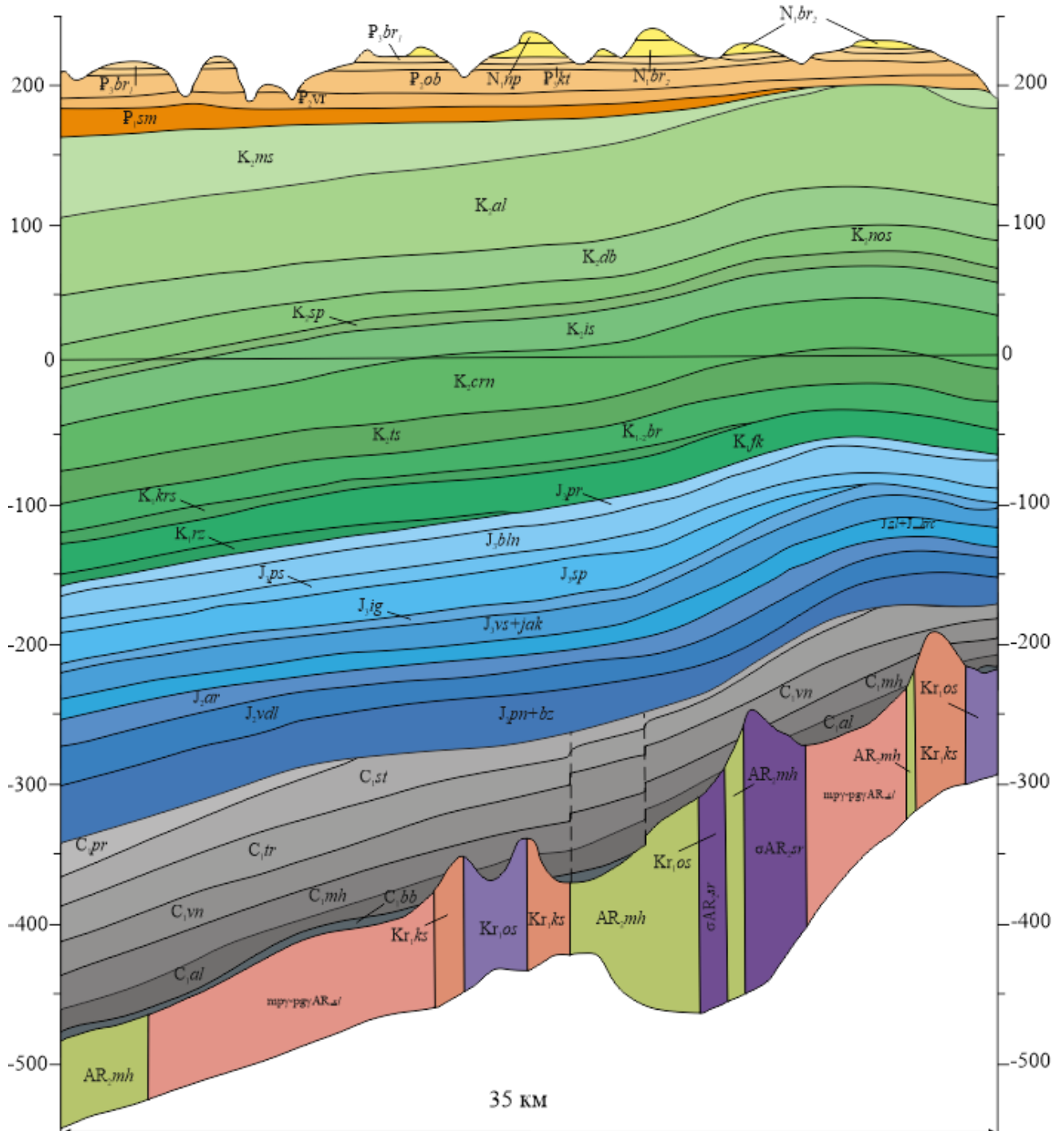


Рисунок 2.5 – Разрез вкрест простирания рудной полосы (ЮЗ-СВ) в 8 км северо-западнее рудника по данным ГК М 1:200000 листа М-37-VII (Обоянь) [86]

P_{ob}	Обуховская свита. Алевриты		
P_{vr}	Воробьевская свита. Глины, опоки глинистые, алевриты. Киевская свита (Kv). Глины, пески глинистые Стеблянкинская свита (St). Алевриты, пески		
P_{bc}	Бучакская свита Нерасчлененные образования. Пески с прослоями глины и алевролитов	N_{np}	Новопетровская свита. Пески с прослоями глины Циркониеносные пески
P_{bc}^2	Верхняя пачка. Пески с прослоями алевролитов, с линзами песчаников Строительные пески	N_{br_2}	Верхняя (сивашская) подсвита. Пески с прослоями глины
P_{bc}^1	Нижняя пачка. Пески с прослоями алевролитов и песчаников Строительные пески	P_{br_1}	Нижняя (змиевская) подсвита. Глины, алевриты, пески
P_{kn}	Каневская серия. Алевролиты и алевриты, песчаники	P_{kt}	Кантемировская свита. Пески Строительные пески
P_{sm}	Сумская серия. Глины, мергели		
K_{sd}	Новгородская серия Суджанская свита. Мел слабо глинистый Мел		
K_{ms}	Масловская свита. Мел белый, писчий Мел		
K_{al}	Алексеевская свита. Мергели мелоподобные Сырье для цементной промышленности	J_{pr}	Прохоровская свита. Песчаники, известняки, глины
K_{db}	Дубенковская свита. Мергели кремнеземистые Сырье для цементной промышленности	J_{bln}	Беленихинская свита. Известняки, алевролиты, песчаники
K_{nos}	Новооскольская свита. Мергели мелоподобные (16–31 м).	J_{ps}	Псловская свита. Глины с прослоями известняков
K_{sp}	Сапрыкинская свита. Мергели кремнеземистые	J_{sp}	Шопинская толща. Глины с прослоями известняков
K_{is}	Истобенская свита. Мел глинистый, мергели мелоподобные	J_{ig}	Игуменковская свита. Глины
K_{crn}	Чуфичевская серия Чернянская свита. Мел белый, писчий	J_{vs+jak}	Висловская и яковлевская свиты объединенные. Глины известковистые
K_{ts}	Тускарская свита. Мел белый, писчий, песчаный в основании	$J_{2l+J_{2-3}kr}$	Железногорская и корочанская свиты объединенные. Глины, пески
K_{br}	Брянская серия. Пески	J_{ar}	Аркинская свита. Пески с прослоями алевролитов и глины
K_{krs}	Криушанская свита. Пески с прослоями глины	J_{vdl}	Вейделевская свита. Алевриты, пески, глины
K_{fk}	Фокинская серия. Алевриты, глины, пески	J_{pn+bz}	Пеновская, раkitннская, безгинская свиты объединенные. Глины, пески
$K_{r\pi}$	Рязанская серия. Глины песчаные	Kr_{os}	Оскольская серия*. Сланцы, метапесчаники, метаконгломераты
C_{pr}	Протвинская свита*. Известняки	Kr_{ks}	Курская серия*. Железистые кварциты, сланцы, метапесчаники
C_{st}	Стешевская свита*. Известняки, глины	AR_{mh}	Михайловская серия*. Парагнейсы, сланцы, ортоамфиболиты
C_{tr}	Тарусская свита*. Известняки, глины, доломиты	$mp\gamma-p\gamma AR_{sl}$	Салтыковский комплекс*. Плагиогранит-мигматиты, метатектит-плагиограниты
C_{vn}	Веневская свита*. Известняки, мергели, глины	σAR_{sr}	Сергиевский комплекс*. Метагабброиды, метагипербазиты, метаперидотиты, метадуниты (σ)
C_{mh}	Михайловская свита*. Известняки с прослоями глины и алевролитов		
C_{al}	Алексинская свита*. Алевролиты, глины		
C_{bb}	Бобриковская свита*. Песчаники, конгломераты, брекчии, глины, линзы бурого угля		

Рисунок 2.6 – Условные обозначения к разрезу (рис. 2.5) по данным ГК М 1:200000 листа М-37-VII (Обоянь) [86]

Средний-верхний подъярусы батского яруса.

Вейделевская свита (J_{2vdl}) представлены тонким чередованием глинистых алевроитов, алевроитовых глин и тонкозернистых песков светло-серого цвета. Мощность свиты около 25 м.

Аркинская свита (J_{2ar}) представлена аллювиально-озерными и аллювиальными фациями, сложенными песками светло-серыми тонко-мелкозернистыми с линзами и прослоями алевроитов и глин. Мощность не превышает 12 м.

Верхний подъярус батского яруса – средний подъярус оксфордского яруса.

Железногорская и корочанская свиты объединенные ($J_{2zl}+J_{2krc}$) распространены повсеместно. Нижнюю часть разреза составляет железнгорская свита, представленная глинами темно-серыми до черных, углистыми, со стяжениями пирита, реже, алевроиты глинистые и тонкозернистые пески. Перекрывается корочанской свитой, представленной разнoзернистыми песками, алевроитами и буровато-серыми глинами. Общая мощность достигает 10 м.

Средний подъярус оксфордского яруса – нижний подъярус кимериджского яруса.

Висловская и яковлевская свиты ($J_{2vs}+jak$) распространены повсеместно.

Висловская свита сложена серой алевроитовой глиной, постепенно переходящей в светлый кварцевый мелко-тонкозернистый песок и песчаник на карбонатном или глинистом цементе. Встречаются также редкие прослои крепких пелитоморфных известняков.

Яковлевская свита согласно перекрывает висловскую свиту. Литологически представлена глинами светло-серыми с обрывками водорослей. Средняя мощность отложений 15 м.

Верхний подъярус кимериджского яруса.

Игуменовская свита (J_{2ig}) представлена в разрезе глинами серыми с бежевым оттенком, подстилающимися алевролитами на карбонатном цементе. Мощность выдержана и составляет 3-5 м.

Титонский ярус.

Шопинская свита (J_{2sp}) выклинивается в пределах рассматриваемого участка. Сложена, в основном, глинами серыми с линзовидными прослоями пелитоморфных известняков. В основании залегает алевролит с галькой и гравием фосфорита. Мощность может достигать 25 м.

Псловская свита (J_{2ps}) представлена глинами серыми с бежевым оттенком, известковистыми, с прослоями из алевроитов и алевролитов. В приподошвенной части переслаиваются с серыми известняками. Мощность до 5 м.

Беленихинская свита (J_{3bln}) имеет разрез, представленный известняком, к кровле переходящим в мергели с прослоями алевролитов и песчаников на карбонатном цементе. Мощность относительно выдержанная и составляет в среднем 20 м.

Прохоровская свита (J_2pr) имеет неоднородное в разрезе строение. В верхней части представлена чередованием мелкозернистых кварцевых песчаников с известковым цементом и известняками. Нижняя часть характеризуется наличием серых глин с редкими прослоями известняков. Мощность до 5 м.

Меловая система.

Меловые отложения в пределах рассматриваемого участка широко распространены. Характеризуют трансгрессивный этап, а в кровле с размывом перекрываются отложениями палеогеновой системы, неогеном и квартером. Наследуют моноклиальную структуру фанерозойского чехла с падением на юго-запад. Система представлена нижним и верхним отделами.

Берриасский ярус.

Рязанская серия (K_{1rz}) с размывом залегает на осадках юрской системы и выклинивается в пределах участка. Сложена глинами с примазками углей и редким песчаным материалом. В подошве глины обогащены глауконитовыми и железистыми образованиями. Мощность достигает 5 м.

Готеривский и барремский ярусы.

Фокинская серия (K_{1fk}) имеет повсеместное распространение и с размывом залегает на породах рязанской серии. В разрезе имеет два выраженных интервала. Нижний сложен глинами голубовато-серыми с ожелезнёнными примазками и прослоями алевролитов. Верхний представлен пачкой алевролитов с тонкими прослоями глин. Мощность достигает 25 м.

Аптский ярус.

Криушанская свита (K_{1krs}) залегает с размывом на фокинской. Свита сложена кварцевыми песками аллювиального генезиса с тонкослойной текстурой и редкими прослойками глин. Мощность достигает 5 м.

Альбский, сеноманский ярусы.

Брянская серия (K_{1-2br}). Глауконит-кварцевые мелкозернистые пески составляют всю серию и характеризуются незначительным содержанием фосфоритов в верхней части разреза. Мощность не превышает 20 м.

Туронский и коньякский ярусы.

Тускарьевская свита (K_{2ts}). Представлена писчими белыми мелями с наличием гравия и гальки фосфоритов брянской серии в своей приподошвенной части. Мощность до 25 м.

Чернянская свита (K_{2crn}) полностью сложена белыми писчими мелями. Мощность свиты в пределах рассматриваемого участка до 25 м.

Сантонский ярус.

Истобенская свита (K_{2is}) литологический состав характеризуется глинистыми мелями, постепенно переходящими в мелоподобные мергеля. Мощность увеличивается в юго-западном направлении и достигает 20 м.

Сапрыкинская свита (K_{2sp}) на рассматриваемом участке распространена повсеместно. Представлена серыми мергелями, иногда слабо кремнеземистыми. Средняя мощность 5 м.

Новооскольская свита (K_{2nos}) сложена мергелями мелоподобными светло-серыми, часто глинистыми. Мощность достигает 15 м.

Кампанский ярус.

Дубенковская свита (K_{2db}) сложена кремнеземистыми мергелями с большим объемом глинистого материала. В прикровельной части встречаются прослои песков и алевролитов. Мощность в среднем около 40 м.

Алексеевская свита (K_{2al}) сложен мергелями белыми, реже голубовато-серыми, светло-серыми. Характерно увеличение степени кремнеземности в верхней части разреза. Мощность до 100 м.

Масловская свита (K_{2ms}) представлена белыми пясчими мелями мощностью до 60 м.

Маастрихтский ярус.

Суджанская свита (K_{2sd}) сложена белыми пясчими мелями, глинистыми в нижней части разреза. Распространена в крайней юго-западной части участка, где её мощность достигает 2 м.

Палеогеновая система.

На рассматриваемом участке отложения системы распространены повсеместно, за исключением участков палео- и нео-эрозионной сети. Литологический состав пород отражает трансгрессивный этап осадконакопления. Отложения представлены разными возрастами - палеоценовым, эоценовым и олигоценовым.

Палеоцен.

Сумская серия (P_{1sm}) характеризуется преобладанием темноцветных глин с прослоями опок. В приподошвенной части серии встречаются линзы песчаников. Характерными также являются серые глины, местами слюдистого или известкового состава. Общая мощность свиты достигает местами 20 м.

Эоцен.

Каневская серия (P_{2kn}). Литологический состав представлен пачкой алевролитов и песчаников слабосцементированных тонкозернистой фракции. Породы серии имеют однородное строение с повышенным содержанием глауконита и слюды. Мощность варьируется от первых метров до 20 м.

Бучакская свита (P_{2bc}) на полную мощность сложена кварцевыми песками с глауконитовыми включениями. В основании свиты в незначительном количестве встречаются галька и гравий. Мощность отложений контролируется эрозионными процессами.

Воробьевская свита (P_{2vr}) на рассматриваемом участке сложена выдержанным интервалом кремнисто-глинистых отложений. Имеет мощность от 5 до 10 м.

Киевская свита (P_{2kv}). Литологический состав свиты характеризуется наличием терригенных карбонатно-глинистых отложений мощностью не более 15 м. Для накоплений свойственны переходные разности между кремнеземисто-глинистым и карбонатно-глинистым составом пород.

Обуховская свита (P_{2ob}) сложена слюдистыми плотными однородными глинистыми алевритами, залегающими с разрывом на нижележащих отложениях. В среднем мощность составляет 20 м.

Олигоцен.

Кантемировская свита (P_{2kt}) в пределах рассматриваемого участка развита преимущественно на водораздельных пространствах и является маломощной (1-4 м) ожелезненной базальной пачкой. Отложения свиты представлены разнозернистыми кварцевыми светлыми песками, в основном мелкой и алевритистой фракции. Мощность достигает 3 м.

Нижняя (змиевская) подсвита (P_{2br1}) распространена на высоких водораздельных пространствах. Представлена, преимущественно, глинистой пачкой с прослоями алевритов. Глины серые и зеленовато-серые неравномерно песчанистые, тонколистоватые, иногда с присыпками белого кварцевого алеврита. Максимальная мощность подсвиты 6 м.

Неогеновая система.

Верхняя (сивашская) подсвита (N_{1br2}) на рассматриваемой территории встречается исключительно на водоразделах. В разрезе преобладают алевриты песчанистые с примесью глины. Мощность до 10 м.

Новопетровская свита (N_{1np}) характеризуется аналогичным сивашкой подсвите распространением. Породы залегают на подстилающих с разрывом, в виде изолированных «островков». Свита сложена мелкозернистыми песками, с незначительными коэффициентами неоднородности. Характерно незначительное количество глинисто-алевритовых осадков монтмориллонит-каолинистового или гидрослюдистого состава. Мощность достигает 10 м.

Четвертичная система.

Рассматриваемый участок является частью территории внеледниковой области Русской равнины, для которой характерно наличие субэразовых разностей (аллювиальных, элювиальных и др.) плейстоценного и голоценного возраста.

Интрузивный магматизм.

В кристаллическом фундаменте установлены позднеархейские сергиевский и салтыковский комплексы.

Сергиевский габбро-дунит-перидотитовый комплекс (σAR_{2sr}) включает дайки и силлы метагипербазитов в Лучкинско–Ивнянской зеленокаменной зоне. Он вскрыт двумя скважинами и представлен метадунитами, метаперидотитами и метапироксенитами в породах александровской свиты, а также дайками метагаббродиабазов.

Салтыковский мигматит-плагиогранитовый комплекс ($gpy, mpy AR_{2sl}$) представлен ультраметаморфическими гранитоидами Яковлевского и Береговского массивов. В пределах массивов находятся мигматизированные в разной степени породы михайловской серии (AR_{2mh}), мигматиты и плагиогранито-гнейсы, метатектит-плагиограниты (рисунок 2.3).

2.1.3 Гидрогеологические условия Яковлевского месторождения

Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII с точки зрения гидрогеологического районирования участок исследований приурочен к северо-восточной части Днепровско-Донецкого артезианского бассейна. Наиболее крупные гидрогеологические стратоны относятся к двум комплексам: верхнему – мезозой-кайнозойскому, и нижнему – архей-палеозойскому, разделённым региональным водоупором байосс-батского возраста, средней мощностью на выделенном участке исследований 30 м (рисунок 2.7) [86].

Подразделения верхнего гидрогеологического комплекса располагаются в зоне активного водообмена, которую традиционно разделяют на две подзоны – весьма активного и значительного водообмена.

Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII к подзоне весьма активного водообмена относятся гидрогеологические подразделения, приуроченные к отложениям палеогенового, верхнемелового возрастов. Для этой подзоны характерна значительная доля инфильтрация атмосферных осадков в общем балансе питания, гидравлическая связь подземных и поверхностных вод. Условия питания, стока, разгрузка и формирование ресурсов подземных вод подзоны тесно связаны с особенностями рельефа и климата. Воды подзоны весьма активного водообмена преимущественно пресные, сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 0,4-1,0 г/дм³. Следует также отметить, что из-за отсутствия выдержанных водоупоров в интервале пород неогена, палеогена и мела воды подзоны весьма активного водообмена наиболее подвержены поверхностному загрязнению [86].

Вторая подзона верхнего гидрогеологического комплекса значительного водообмена представлена отложениями терригенного комплекса от апт-сеномана до байосс-батского

возраста. Режим подземных вод в этой подзоне сравнительно устойчив. Химический состав подземных вод характеризуется как пресный, с минерализацией от 0,3 до 1,0 г/дм³, воды сульфатно-гидрокарбонатные и гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Горизонты подзоны частично используются для водоснабжения.

Пьезометрические уровни водоносных горизонтов верхнего комплекса характеризуются абсолютными отметками в диапазоне от 160 м на северо-востоке до 140 м на юго-западе.

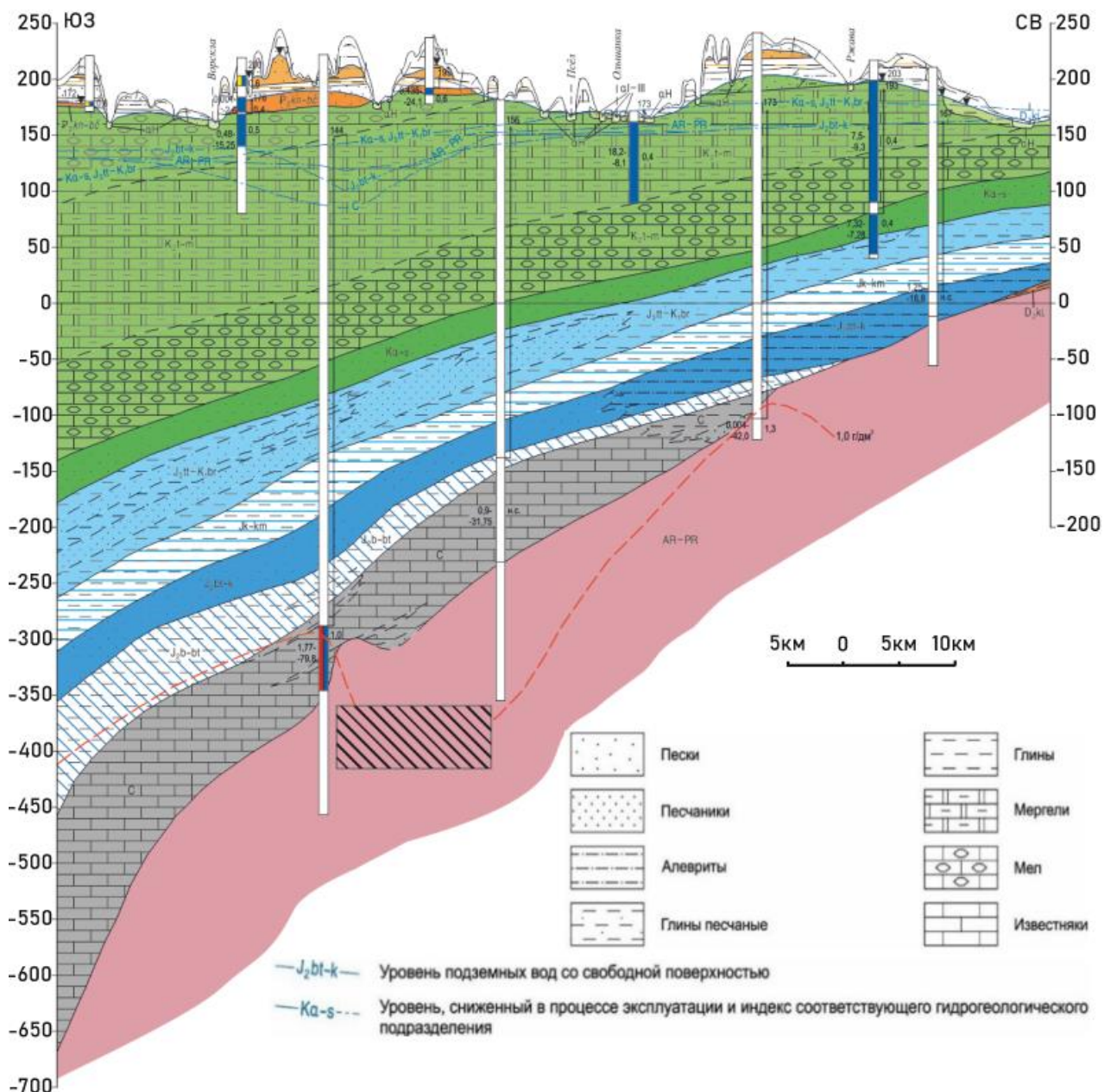


Рисунок 2.7 – Фрагмент регионального разреза района месторождения вкострости рудной полосы по данным ГК М 1:200000 листа М-37-VII (Обоянь) [86]

Второй (нижний) гидрогеологический комплекс замедленного водообмена включает в себя относительно закрытые структуры и охватывает гидрогеологические подразделения, приуроченные к породам архей-протерозоя и нижнего карбона. Питание подразделений данного комплекса формируется за счет рассредоточенного нисходящего перетекания из

верхнего комплекса, а также в 40-70 км к северо-востоку от рудной полосы, где под осадочный чехол фанерозоя выходят породы кристаллического фундамента, а нижнекаменноугольный водоносный горизонт выклинивается. По химическому составу воды комплекса гидрокарбонатно-хлоридные натриевые (до 1 г/дм³) и хлоридные натриевые с минерализацией 3-4 г/дм³ (до 12,5 г/дм³ в зонах разломов). Естественные пьезометрические уровни водоносных горизонтов нижнего комплекса в сравнении с верхним обладают меньшей изменчивостью и устанавливаются на абсолютных отметках 143-146 м. Именно воды нижнего комплекса играют главную роль в формировании водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника.

Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII изменение химического состава подземных вод в вертикальном разрезе является следствием уменьшения с глубиной интенсивности водообмена и усиления роли геохимических процессов. Сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды преобладают в зоне активного водообмена, а в более глубоких гидрогеологических подразделениях в составе вод увеличивается роль хлора и натрия. Рост концентрации хлора с глубиной является наиболее характерной особенностью вертикальной гидрогеохимической зональности рассматриваемой территории [86].

В результате более чем полувековой истории изучения гидрогеологических условий на рассматриваемой территории был накоплен большой объем данных об естественных напорах, строении, химическом составе и фильтрационных параметрах водоносных горизонтов. В частности, крупномасштабные буровые и геофизические работы, фильтрационные опробования в рамках гидрогеологических исследований и инженерно-геологических изысканий, опытно-производственные водопонижения и мониторинг среды во время эксплуатации месторождения позволяют сформировать подробную картину о структуре и закономерностях гидрогеологических условий.

С 1955 по 1962 гг. исследование естественного гидрохимического и гидродинамического режима подземных вод производилось по 97 гидрогеологическим скважинам общим метражом 45400 м. Всего было проведено: 71 одиночная, 8 кустовых и 2 групповых откачки по следующим скважинам (рис. 2.8). Подробно изучены фильтрационные параметры лежащего и висячего блоков рудной залежи. Было отобрано 223 пробы подземных вод на химический анализ и 2000 монолитов горных пород для исследования физико-механических, водных и фильтрационных свойств [85].

Гидрогеологические условия верхнего комплекса изучались по 66 скважинам, из которых на породы меловой системы пришлось 30 скважин, а на породы юры 19. Водообильность и фильтрационные особенности строения нижнекаменноугольного водоносного горизонта изучались по 21 скважине, при этом было проведено 3 кустовых и одна

групповая откачка. Рудно-кристаллический комплекс опробовался в 15 скважинах, в том числе одной кустовой и групповой откачками [85].

В рамках доразведки месторождения в 1986 г. был пробурен профиль из 9 гидрогеологических скважин в плане непосредственно на площади ведения очистных работ. Фильтрационные опробования включали в себя одиночные откачки из каждой скважины при двух ступенях дебитов как для руднокристаллического, так и нижнекаменноугольного горизонтов [82]. Вместе с тем проводилось уточнение строения приподошвенной части нижнекаменноугольного водоносного горизонта и комплекс геофизических исследований, направленных на выявления наиболее проницаемых интервалов.

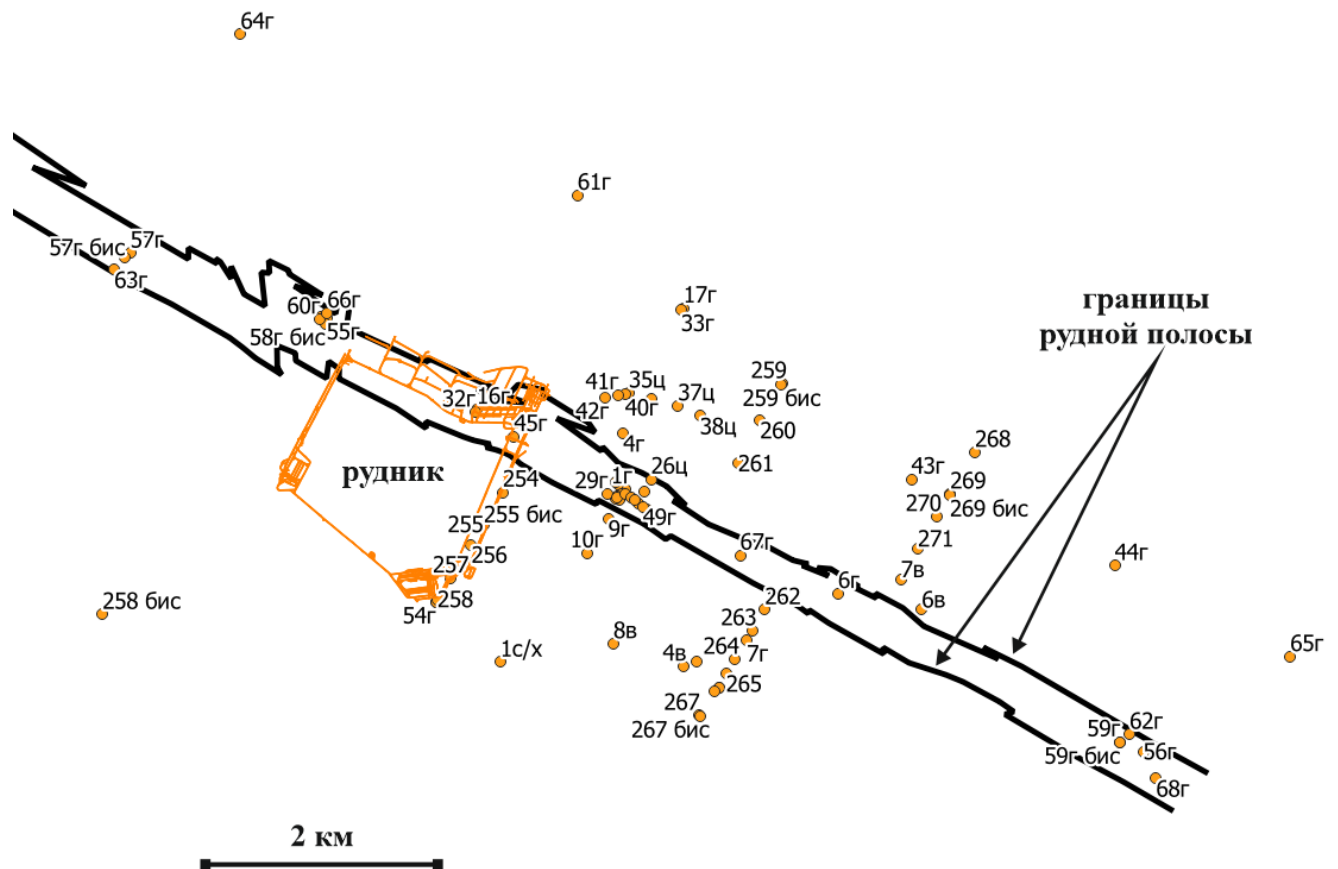


Рисунок 2.8 – Фонд опытных и наблюдательных гидрогеологических скважин, использованных в рамках геологоразведочных работ 1956-1961 гг. [79, 80, 84] (составлено автором)

Целесообразно рассмотреть краткую характеристику выделяемых в настоящий момент в районе исследований гидрогеологических подразделений согласно ГК М 1:200 000 листа М-37-VII:

Харьковско-полтавский терригенный водоносный комплекс ($P_{2-3hr-pl}$). Водовмещающими отложениями слабоводоносного комплекса являются породы интервала обуховской (P_{2o}) – новопетровской (N_{1np}) свит. Геологическое строение комплекса обуславливает приуроченность водоносного горизонта к водораздельным пространствам. В

кровле перекрыт четвертичными отложениями, при этом подстилающими породами служат накопления киевско-воробьевского горизонта.

Основной объем водовмещающих пород составляют пески, реже встречаются пески с прослоями глин, алевроиты и песчаники. Комплекс обладает преимущественно безнапорным режимом, однако, редкие прослои глинистых пород в прикровельной части горизонта способствуют образованию избыточного напора до 1 м. Уровень подземных вод может устанавливаться на глубинах до 40 м.

Невыдержанная литология из пород большого диапазона фракций обуславливает сильные колебания значений коэффициентов фильтрации (от 0,1 до 16 м/сут). Водопроницаемость комплекса не превышает 30 м²/сут и не опускается ниже 0,05 м²/сут. Средний коэффициент фильтрации по результатам опытно-фильтрационных исследований в рамках геологоразведочных работ в XX в. составил 0,9 м/сут. Минерализация подземных вод колеблется от 0,3 до 1 г/дм³, при этом состав характеризуется как сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый.

Питание осуществляется как напрямую рассредоточено путем инфильтрации атмосферных осадков по всей территории распространения комплекса, так и при перетекании из перекрывающих отложений четвертичного возраста. В зависимости от действующих градиентов, разгрузка вод может осуществляться в смежные подстилающие и перекрывающие водоносные горизонты, а также в речную сеть.

В районе исследований широко развито сельское хозяйство, в связи с чем, на водоносный горизонт нередко оборудуются водозаборные сооружения, каптируются родники и строятся колодцы.

Водоупорный киевско-воробьевский терригенный горизонт (P₂kv-vr) приурочен к мергелисто-глинистым водоупорным породам одноименных свит. На участке исследований имеет широкое распространение, тяготеющее к водораздельным пространствам. Истинная мощность в большинстве случаев не превышает 20 м. Коэффициент фильтрации по данным опробований в рамках геологоразведочных работ 1956-1958 гг. составил 0,02 м/сут.

Каневско-бучакский терригенный слабоводоносный комплекс (P₂kn-bc). Водовмещающими породами комплекса служат отложения сумской серии и бучакской свиты преимущественно песчаного и алевроитового состава с прослоями глин. Глубина залегания уровня подземных вод достигает 70 м. Режим характеризуется наличием избыточных напоров величиной до 8 м, однако, вблизи зон разгрузки в местную гидросеть, на склонах речных долин приобретает напорно-безнапорный и безнапорный режим. Питание комплекса схоже с Харьковско-полтавским и осуществляется как за счет инфильтрации осадков, так и с помощью смежных водоносных горизонтов верхнего комплекса.

Согласно проведенным опытно-фильтрационным работам, фильтрационные параметры комплекса составляют 0,02-5,7 м/сут (для коэффициента фильтрации), 0,2-8,3 м²/сут (для водопроницаемости комплекса). $4 \cdot 10^{-4}$ -1,5 л/с (для удельных дебитов как скважин, так и колодцев). Для подземных вод комплекса свойственен сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав с минерализацией в среднем 0,6 г/дм³.

Непосредственно в пределах Яковлевского месторождения коэффициент фильтрации определялся в рамках опытно-фильтрационных опробований комплекса в 1957-1958 гг., который по данным одиночной откачки составил 0,92 м/сут.

Водоносный турон-маастрихтский терригенно-карбонатный комплекс (K_{2t-m}) включает в себя породы тускарьской (K_{2ts}) – суджанской (K_{2sd}) свит. Распространен на всей территории исследований и плавно погружается в юго-западном направлении. Абсолютные отметки кровли водоносного комплекса в районе исследований составляют в среднем 170 м. Подошва комплекса также моноклинально погружается на юго-восток.

Основными водовмещающими разностями являются мела, мергели, пески и алевриты. Глубина залегания уровня подземных вод устанавливается от земной поверхности составляет 10-76 м. Комплекс характеризуется напорно-безнапорным режимом фильтрации, при этом максимальные значения избыточного напора не превышают 36 м. Мощность водовмещающих пород увеличивается с северо-востока на юго-запад с 50 до 350 м.

Горизонт опробовался 16 скважинами. Коэффициенты фильтрации водовмещающих пород варьируют в очень широких пределах: от 0,0001-0,0015 м/сут в некоторых приподошвенных частях и до 7 м/сут в речных долинах. Более того, верхняя мело-мергелевая часть водоносного горизонта в диапазоне мощностей до 60 м от кровли является трещиноватой, для которой характерны самые высокие средние значения фильтрационных параметров (4,95 м/сут) [58]. В целом, опытные скважины, оборудованные на всю мощность горизонта, демонстрируют средние значения коэффициентов фильтрации 0,2 м/сут. Наибольшие значения водопроницаемости 2060 м²/сут, самые низкие – 0,01 м²/сут. Фильтрационная неоднородность в разрезе, характеризующаяся наличием практически водоупорных отложений в приподошвенной части комплекса и напорно-безнапорный режим фильтрации позволяет отнести его к слабоводоносным.

Минерализация подземных вод комплекса варьирует в диапазоне 0,4-0,8 г/дм³ с максимальными значениями до 1,5 г/дм³, состав же характеризуется как гидрокарбонатно-кальциевый и сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый.

Перетекание из смежных гидрогеологических стратонів формирует основную часть питания комплекса. Разгрузка подземных вод на территории исследований производится в речную сеть.

Водоносный альб-сеноманский терригенный комплекс (K_{1-2a-s}) представлен осадочными накоплениями криушанской (K_{1krs}) свиты и брянской (K_{1-2br}) серии. Комплекс распространен на всей территории исследований, где повсеместно перекрывает слабоводоносный титонско-барремский терригенно-карбонатный комплекс, с которым гидравлически связан. Вышележащий турон-маастрихтский комплекс ввиду наличия водоупорных отложений в приподошвенной части гидравлически слабо связан с альб-сеноманским, для которого водовмещающими породами являются пески разной зернистости с прослоями глин. Абсолютные отметки естественного уровня подземных вод плавно возрастают в северо-западном направлении с 150 м до 155 м.

Ввиду наличия действующих водозаборных сооружений для обеспечения хозяйственно-питьевых нужд городов Курск и Харьков, для района исследований характерны пониженные стояния уровней подземных вод комплекса. В настоящее время участок исследований находится на периферии депрессионной воронки, в её пологой части, со средним понижением 25 м.

По результатам девяти одиночных откачек, проведённых в рамках геологоразведочных работ в 1956-1958 гг. коэффициенты фильтрации комплекса составили 0,03-1,2 м/сут. Относительно однородный литологический состав обуславливает выдержанность водообильности комплекса на территории исследований.

Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII значения водопроницаемости на большей части территории не превышают 100 м²/сут. На рассматриваемой территории воды преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 0,4-0,6 г/дм³. Питание комплекса происходит за счет перетока из смежных гидрогеологических подразделений. Разгрузка – к югу за пределами рассматриваемой территории [86].

Слабоводоносный титонско-барремский терригенно-карбонатный комплекс (J_{3tt}-K_{1br}). На участке исследований комплекс имеет повсеместное распространение. Мощность водовмещающих отложений увеличивается с северо-востока (45 м.) на юго-запад (до 100 м). Литологические разности титонско-барремского комплекса представлены неравномерным переслаиванием глин, песка, песчаника, известняка. Абсолютные отметки естественного уровня подтверждают наличие гидравлической связи между горизонтами верхнего комплекса и составляют в среднем 150-155 м, плавно погружаясь на юго-восток.

Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII коэффициенты фильтрации по данным откачек варьируют от 0,01 до 0,4 м/сут., в среднем 0,15 м/сут. Водопроницаемость от 0,1 до 52 м²/сут. В северной части рассматриваемой территории воды комплекса имеют сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый состав с минерализацией 0,4-0,6 г/дм³ [86].

Водоносные комплекс на территории исследований характеризуется транзитным режимом фильтрации, при этом его питание происходит за счет перетекания из смежных гидрогеологических подразделений. Разгрузка подземных вод осуществляется за юго-западной границей участка в пределах Днепровско-Донецкой впадины.

Относительно водоупорный келловей-кимериджский терригенный комплекс ($J_3k - km$) представлен накоплениями интервала корочанской (J_{2-3krc}) – игуменской (J_{3ig}) свит. Распространен на всей территории исследований. Комплекс повсеместно перекрывает слабоводоносный бат-келловейский терригенный комплекс. Подстилающими породами являются отложения слабоводоносного титонско-барремского терригенно-карбонатного комплекса. В строении комплекса принимают участие глины, известняки, алевролиты суммарной мощностью в диапазоне 35-50 м.

Опытно-фильтрационные работы по определению фильтрационных параметров проводились единожды (одиночная экспресс-откачка), в ходе интерпретации которой был установлен коэффициент фильтрации 0,003 м/сут.

Слабоводоносный бат-келловейский терригенный комплекс (J_{2bt-k}) представлен накоплениями интервала вейделевской (J_{2vdl}) – корочанской (J_{2-3krc}) свит. Пространственно в районе исследований повсеместно перекрывает региональный терригенный водоупор байосс-батского возраста. Также повсеместно подстилает *келловей-кимериджский терригенный комплекс*. Водовмещающие породы представлены алевролитами с песками и прослоями глин.

Ввиду наличия гидравлической связи с вышележащим комплексом, естественный уровень подземных вод бат-келловейского комплекса залегает на глубине 30-80 м и совпадает с келловей-кимериджским терригенным комплексом.

Работа дренажной системы Яковлевского месторождения на протяжении десятков лет обусловила снижение уровней подземных вод комплекса в районе исследований на 90-140 м. Максимальные понижения закономерно наблюдаются в непосредственной близости к очистным выработкам рудника, расположенным в теле рудной полосы.

В период геологоразведочных работ на Яковлевском месторождении (1956-1959 гг.) водоносный комплекс был опробован 15 раз. По результатам опытно-фильтрационных исследований были определены фильтрационные параметры: коэффициенты составляют 0,2-2,3 м/сут (в среднем 0,5 м/сут); величина водопроницаемости составляет 1-39 м²/сут; пьезопроводность комплекса была определена по кустовой откачке и составила 5*10⁵ м²/сут.

Химический состав подземных вод характеризуется как гидрокарбонатный кальциевый, при этом величина сухого остатка колеблется в диапазоне 0,2-0,5 г/дм³.

Питание бат-келловейского комплекса на территории участка исследований осуществляется путем перетекания из вышележащих водоносных комплексов. Разгрузка в

естественном режиме расположена в региональном базисе дренирования за юго-западной границей района исследований. Ввиду наличия подстилающего регионального водоупора комплекс не участвует в непосредственном формировании водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника.

Водоупорный байосс-батский терригенный комплекс (J2b-bt) представлен осадочными накоплениями интервала пеновской (J_{2pn}) – безгинской (J_{2bz}) свит. На участке исследований водоупор повсеместно перекрывает нижнекаменноугольный терригенно-карбонатный комплекс и подстилает слабоводоносный бат-келловейский терригенный комплекс. Мощность водоупора постепенно увеличивается с его погружением в юго-западном направлении с 25 метров на северо-восточной границе участка исследований до 50 м на юго-западной. Водоупор характеризуется наличием в составе плотных литифицированных глин с редкими песчаными линзами, в которых заключены воды с напорами 380-390 м. В естественных условиях уровень подземных вод залегает на глубине 70-100 м.

Коэффициент фильтрации глин определён по результатам как 2 полевых работ, так и лабораторных исследований в лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР и составляет 0,00004-0,00006 м/сут. Коэффициент фильтрации песчаных линз, средней мощностью 2-4 м составляет 0,05 м/сут. Химический состав подземных вод характеризуется как хлоридно-гидрокарбонатный натриевый; минерализация в среднем соответствует нижнекаменноугольному водоносному горизонту (0,5 г/дм³).

Байосс-батский региональный водоупор играет роль разделяющего слоя, который обуславливает наличие в разрезе всего участка исследований два гидрогеологических комплекса существенно различных в отношении формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника и связью с атмосферой.

Слабоводоносный-водоносный каменноугольный терригенно-карбонатный горизонт (C) сложен интервалом пород бобриковской (C_{1bb}) – протвинской (C_{1pr}) свит и развит на всей территории исследований. Подстилает региональный терригенный водоупор байосс-батского возраста и перекрывает приуроченный к породам фундамента руднокристаллический водоносный комплекс.

Литологически вмещающие породы представлены известняками разной степени закарстованности с прослоями углистых глин и углей в нижней части разреза комплекса. Общая мощность в пределах исследуемой территории колеблется в диапазоне 25-65 м. В пределах рассматриваемой области естественный уровень устанавливается на отметках 135-150 м (рис. 2.9). При этом величина естественного избыточного напора колеблется от 420 на севере до 500 м на юго-востоке.

Коэффициенты фильтрации изменяются в широких пределах как в плане, так и в разрезе толщи, что обусловлено литологической неоднородностью и развитием карстовых процессов. По данным бурения, провалам бурового инструмента, поглощению раствора и выходу керна по более чем 36 скважинам известно, что верхняя и средняя часть известняков карбона является в той или иной степени закарстованной. Результаты поинтервальных опробований одиночными откачками иллюстрируют наличие интервала повышенной проницаемости в 35 м от кровли, где коэффициент фильтрации составил от 3,8 до 7,12 м/сут (по 7 скважинам). При этом наличие большего количества глинистых прослоев в нижней части в среднем существенно снижает коэффициенты фильтрации этого интервала до 0,03-0,000001 м/сут.

Вместе с вертикальной фильтрационной неоднородностью существует также и плановая, выявленная по результатам масштабных и длительных водопонижений, проводимых в период с декабря 1959 по ноябрь 1961 гг [84]. Связана она прежде всего со сменой литологического состава по латерали, вызванного трансгрессивным осадконакоплением в геологическом прошлом района. Форма достигнутой депрессионной воронки иллюстрирует характер плановой неоднородности нижнекаменноугольного водоносного горизонта (рис. 2.10).

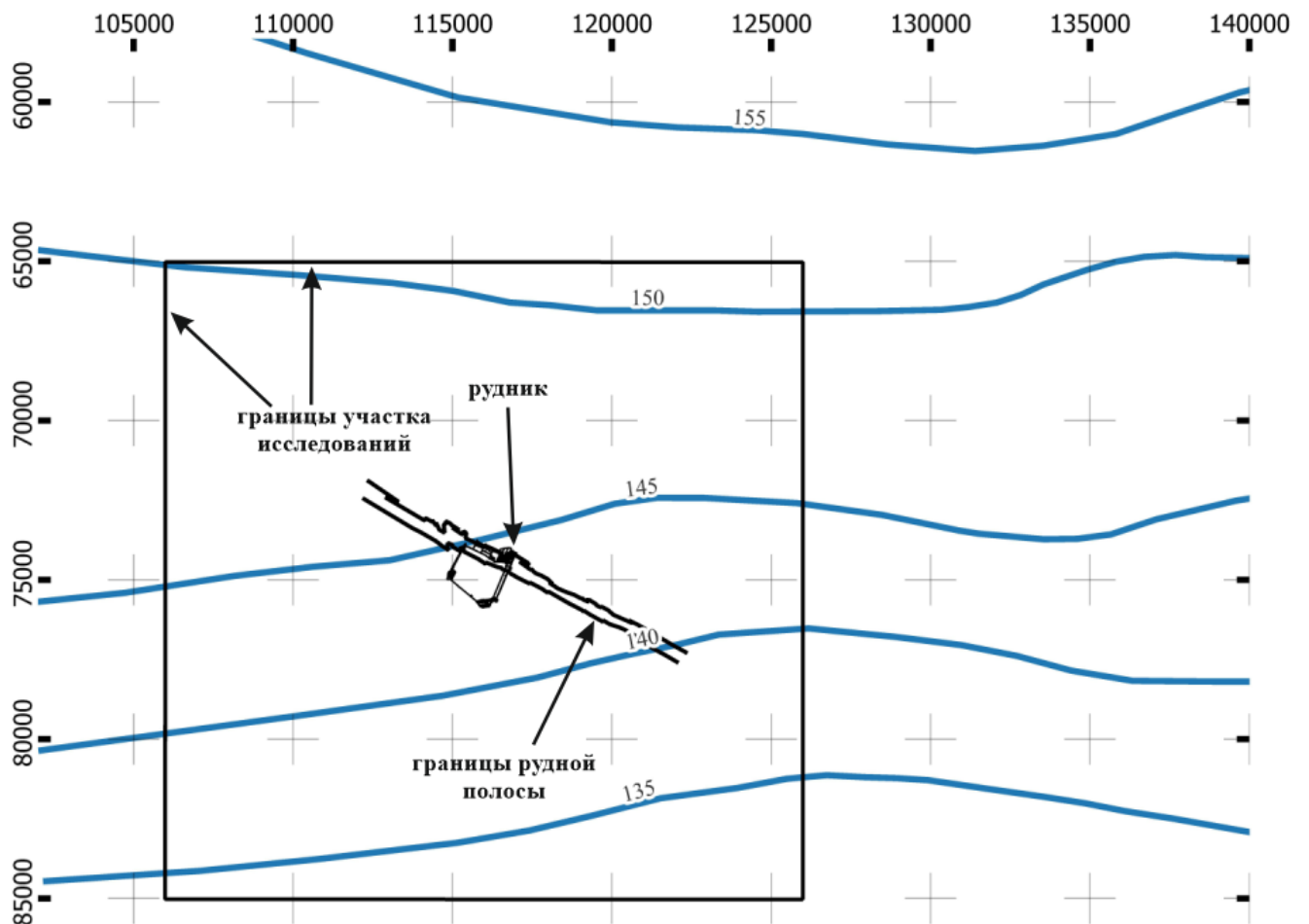


Рисунок 2.9 – Схема гидроизопьез нижнекаменноугольного водоносного горизонта в естественном режиме (по результатам разведки Яковлевского месторождения 1961 г.)

Вместе с тем, на момент 1986 г. было проведено также 9 одиночных откачек, по результатам которых выявлено, что проницаемость горизонта в лежащем боку даже в верхних интервалах составляет 0,05-0,001 м/сут, при этом всячий бок сохраняет неоднородное в разрезе строение. Известняки с бурыми углями, глинами и переотложенными бокситовыми рудами нижней половины обладают средними коэффициентами фильтрации 0,03-0,000001 м/сут, а известняки верхней части 2-5 м/сут.

Воды каменноугольного комплекса по химическому составу охарактеризованы по десяткам проб, отобранных в период геологоразведочных работ, и имеют гидрокарбонатно-хлоридный натриевый состав и минерализацию 0,35-1,1 г/дм³. Значения сухого остатка близкого к единице показывают некоторые защемленные между глинистыми прослоями интервалы, однако, при их дренировании во время фильтрационных исследований, состав вод постепенно сменяется на фоновый со средней минерализацией 0,5 г/дм³, что также подтверждается эксплуатацией дренажных скважин на Яковлевском руднике.

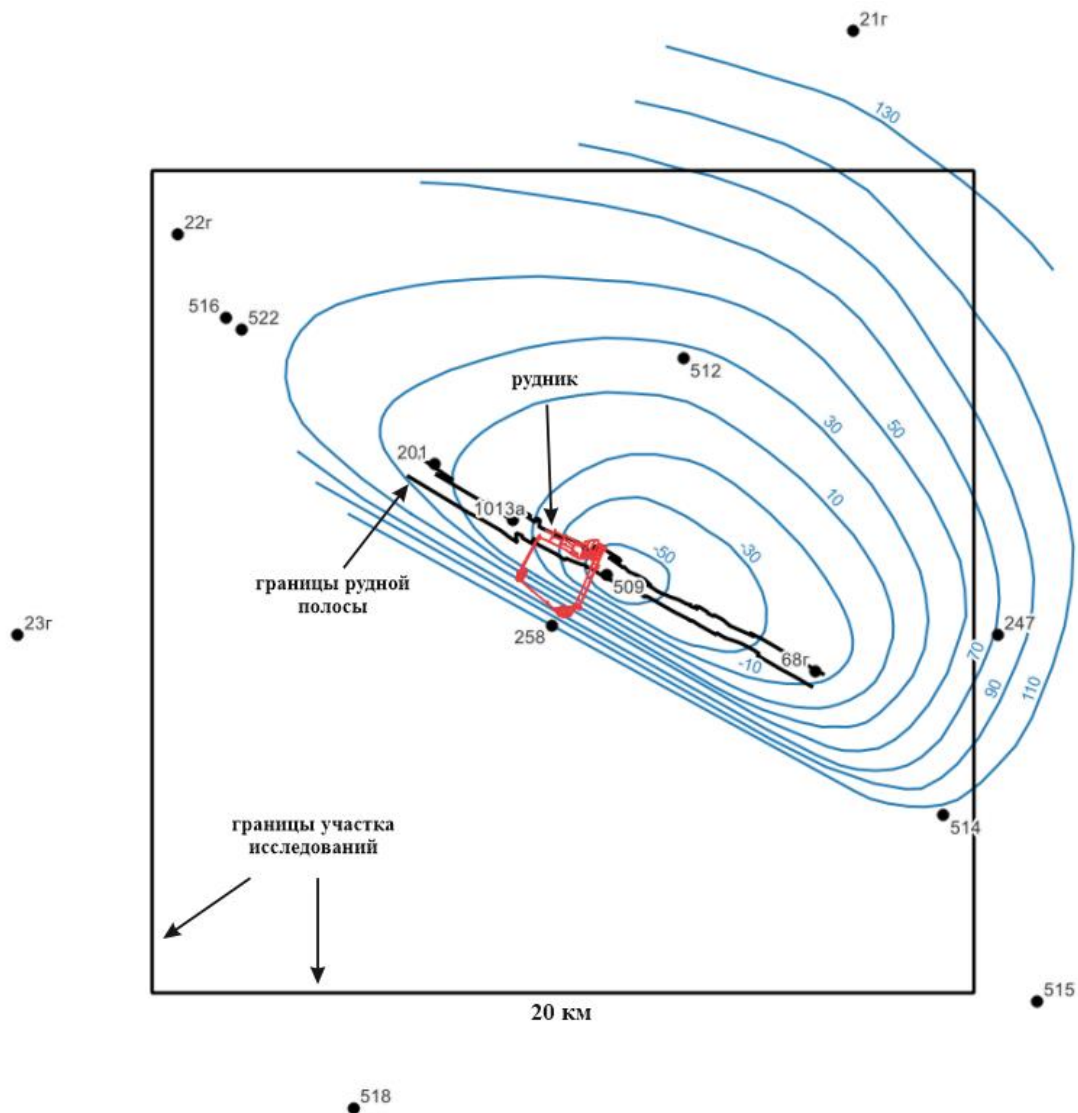


Рисунок 2.10 – Схема гидроизопьез нижнекаменноугольного водоносного горизонта на конец опытного водопонижения 1959-1961 гг (составлено автором)

Основное питание горизонта осуществляется в северной части рассматриваемой территории на удалении 40 км, где происходит постепенная смена его литологического состава на песчаный и выклинивание. Вместе с тем под действием естественного градиента происходит поступление вод через перекрывающий водоупор из водоносных горизонтов верхнего комплекса.

Разгрузка подземных вод в естественных условиях осуществляется за южной границей исследуемого участка.

Слабоводоносная архей-протерозойская трещиноватая зона кристаллических пород AR-PR, (Руднокристаллический комплекс). Согласно записке к ГК М 1:200 000 листа М-37-VII комплекс приурочен к зоне сильно дислоцированных и метаморфизованных пород архея и протерозоя, а также продуктов их выветривания и распространена повсеместно. Водоносная зона подстилает нижнекаменноугольный водоносный горизонт. Статический уровень устанавливается на отметках от 140 до 150 м., что говорит о его гидравлической связи с нижнекаменноугольным водоносным горизонтом, которые объединяются в единый нижний гидрогеологический комплекс [86].

В естественном режиме фильтрационный поток направлен в южном -юго-западном направлении в сторону Днепровско-Донецкой впадины.

Мощность трещиноватой (водонасыщенной) зоны крайне не выдержана. По аналогии с геолого-гидрогеологическими условиями месторождений криворожского бассейна, можно предположить интервал закрытия трещин в диапазоне глубин 100-150 м, где происходит резкое снижение проницаемости [82].

Проницаемость пород архей-протерозойского руднокристаллического комплекса оценивалась одиночными, групповыми и кустовыми откачками по скважинам, пробуренным на основные петрографические разновидности (коры выветривания, железистые кварциты, филлитовые сланцы, плагиограниты и метапесчаники). Одиночные откачки длились в среднем 8 дней, групповые осуществлялись в 3 этапа по 2, 6 и 10 месяцев, при этом достигнутые понижения составили 47,5 м, 76,65 м и 96,9 м соответственно [84].

По результатам исследований было доказано, что неоднородность массива во многом заключается в вертикальном затухании трещиноватости, при этом в плане, по результатам опытно-фильтрационных работ аналогична НВГ но выражена слабее. Данное обстоятельство подтверждается близ изометричной формой депрессионной воронки, достигнутой в период опытных групповых водопонижений в период 1956-1959 гг.

Градиенты по разным направлениям во время опыта и в конце откачки имели различия как в НВГ при пересечении воронкой границ рудной полосы, которые контролируют области

развития кварцитов и их кор выветривания, сланцев, метапесчаников и плагиогранитов (рис. 2.11). Результаты одиночных откачек при доразведке месторождения в 1986 г. указывают на аналогичные результаты [84].

Таким образом, средние коэффициенты фильтрации пород для каждого петротипа составляют: богатые железные руды – 0,1 м/сут; кварциты (в основании руды) – 0,0005 м/сут; сланцы висячего бока – 0,2 м/сут; гранты и метапесчаники лежачего бока – 0,0001 м/сут. Водопроницаемость варьирует от 0,04 до 11 м²/сут. Пьезопроницаемость в среднем составила $6 \cdot 10^4$ м²/сут [82, 84].

Следует также отметить наличие погребенных довишевых разломов, проницаемость дезинтегрированных зон которых в среднем выше пород фундамента, однако их количество мало, а водообильность ограничена незначительными дебитами самоизлива в бортах горных выработок (по данным гидрогеологической съемки рудника).

Химический состав подземных вод РВГ подробно изучен по более чем 200 пробам в рамках геологоразведочных работ и ведения гидрогеологического мониторинга на Яковлевском месторождении. Воды характеризуются хлоридным натриевым составом с минерализацией 1,5-4 г/дм³ и более, до 12,5 г/дм³ в зонах капеза из трещин в стенках выработок Яковлевского месторождения. В среднем, минерализация составляет 2,7-3,5 г/дм³.

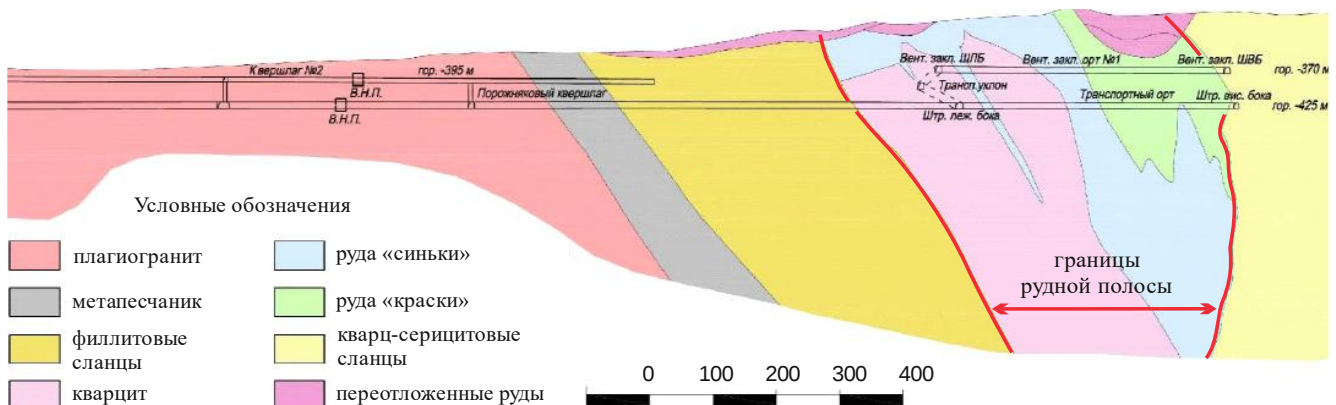


Рисунок 2.11 – Разрез рудокристаллического горизонта вкрест простирания рудного тела вдоль порожнякового квершлага

Питание вод архей-протерозойской трещиноватой зоны происходит в основном за счет перетекания из вышележащих горизонтов, а также из северных областей территории, где происходит региональное поднятие фундамента восточно-европейской платформы и выход его под другие водоносные горизонты осадочного чехла.

Например, ввиду отсутствия выдержанных водоупорных пород в основании перекрывающего нижнекаменноугольного горизонта, существует гидравлическая связь с его

водами. Региональная разгрузка тяготеет к Днепровско-Донецкой впадине, расположенной за границей участка в юг-юго-западном направлении.

2.1.4 Техногенный режим подземных вод Яковлевского месторождения

Освоение подземного пространства Яковлевского месторождения началось 1984-1986 гг. при проходке трёх шахтных стволов диаметром 7,5 м на удалении от рудной полосы на расстояние 1400 м в лежащем боку. Величина водопритока к 1 и 2 стволам в среднем была на 30% выше как при ведении горных работ, так и после. В 1987 году водоприток по всем вышел на стационарный режим и на сегодняшний день не превышает 30 м³/час.

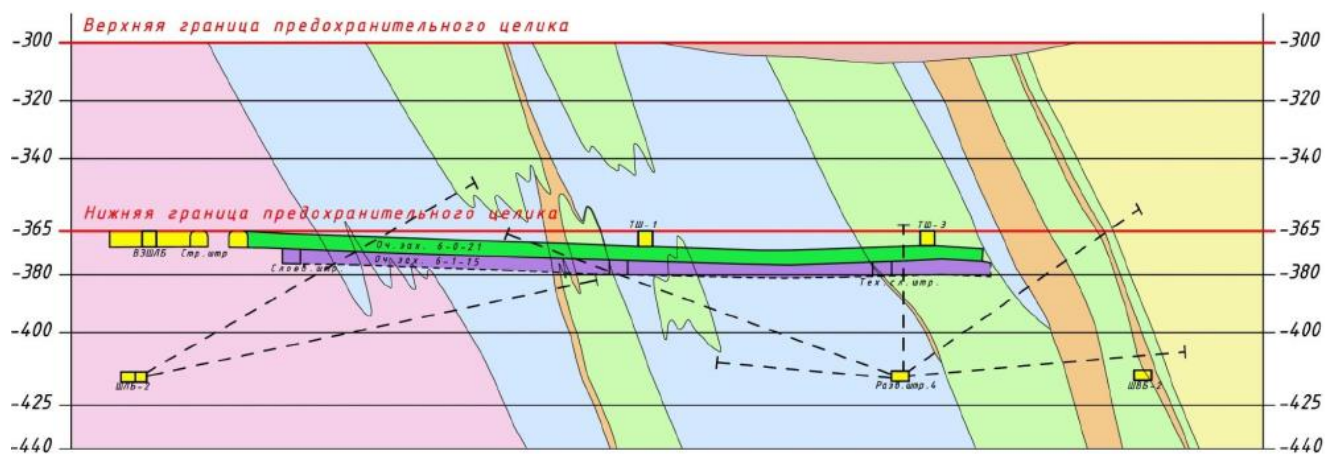
В 1993 г. началось строительство капитальных выработок, соединяющих шахтные стволы с рудным телом, производилось обустройство руддворов, для доступа к руде осуществлялась проходка квершлагов на гор. -425 м. Суммарный водоприток в рудник увеличился до значений 520-560 м³/час.

Выемка руды производится нисходящей слоевой системой с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями (рис. 2.13). Рудное тело нарезается на блоки средней шириной 100 м вкрест простирания вентиляционно-закладочными штреками и панельными ортами. Далее формируется этаж высотой 50 м. между гор. -425 и 375 м. и осуществляется выемка руды, как правило с помощью механической отбойки комбайнами и буровзрывным способом. Средняя высота очистной выработки составляет 4 м, а ширина 5 м.

Очередность проходки выемочных выработок ниже 0-го слоя определяется набором прочности закладки в отработанном перекрывающем слое и ведению работ в смежных по горизонтали очистных выработках.

С 1993 года дренирование очистного пространства осуществляется подземных способом как рассредоточенной системой капитальных выработок, так и сооруженными узлами наклонных дренажных скважин на горизонте -425 м. (рис. 2.14). Действующий проект строительства рудника (2012 г), а также его корректировка (2018 г) сохраняют все дренажные решения без изменений.

Таким образом, водоприток к отдельным участкам рудника определяется разными факторами: близкий к стационарному режим руднокристаллического водоносного горизонта обуславливает постоянные значения водопритока к стволам, их руддворам и квершлагам, заложенным в руднокристаллическом водоносном горизонте (лежащий бок), в то время как водоприток к очистным выработкам изменчив и определяет динамику изменения величины общего водопритока в рудник (рис. 2.14).



Условные обозначения

- | | | |
|---|--|--|
|  - руда железослюдково мартитовая |  - сланец межрудные |  - разведочная скважина |
|  - руда мартито-гидрогематитовая |  - сланец кварц-серицитовый | |
|  - кварцит железослюдково-мартитовый |  - руда переотложенная | |

Рисунок 2.12 – Схема последовательной нисходящей слоевой отработки месторождения на примере 21 орта

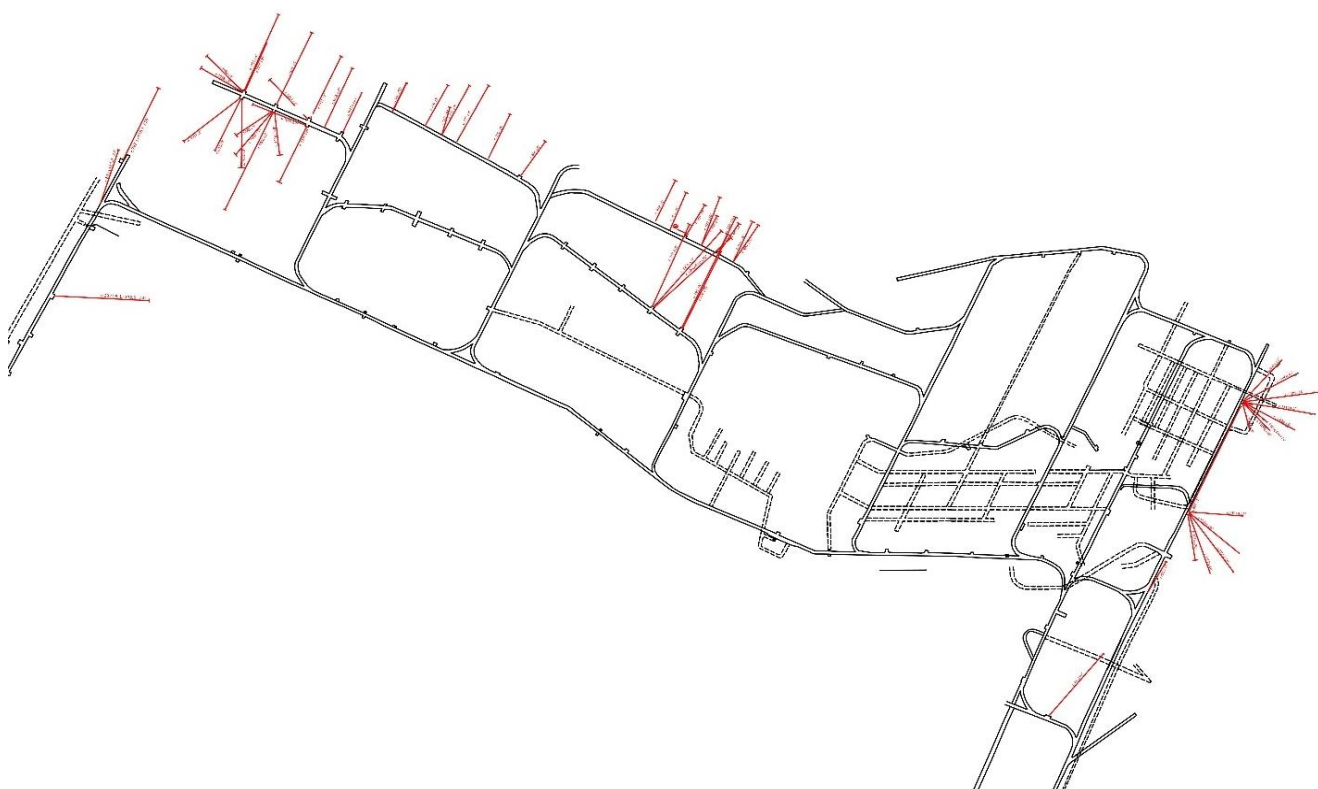


Рисунок 2.13 – Схема расположения дренажных скважин на плане горных выработок гор. - 425 м (составлено автором)

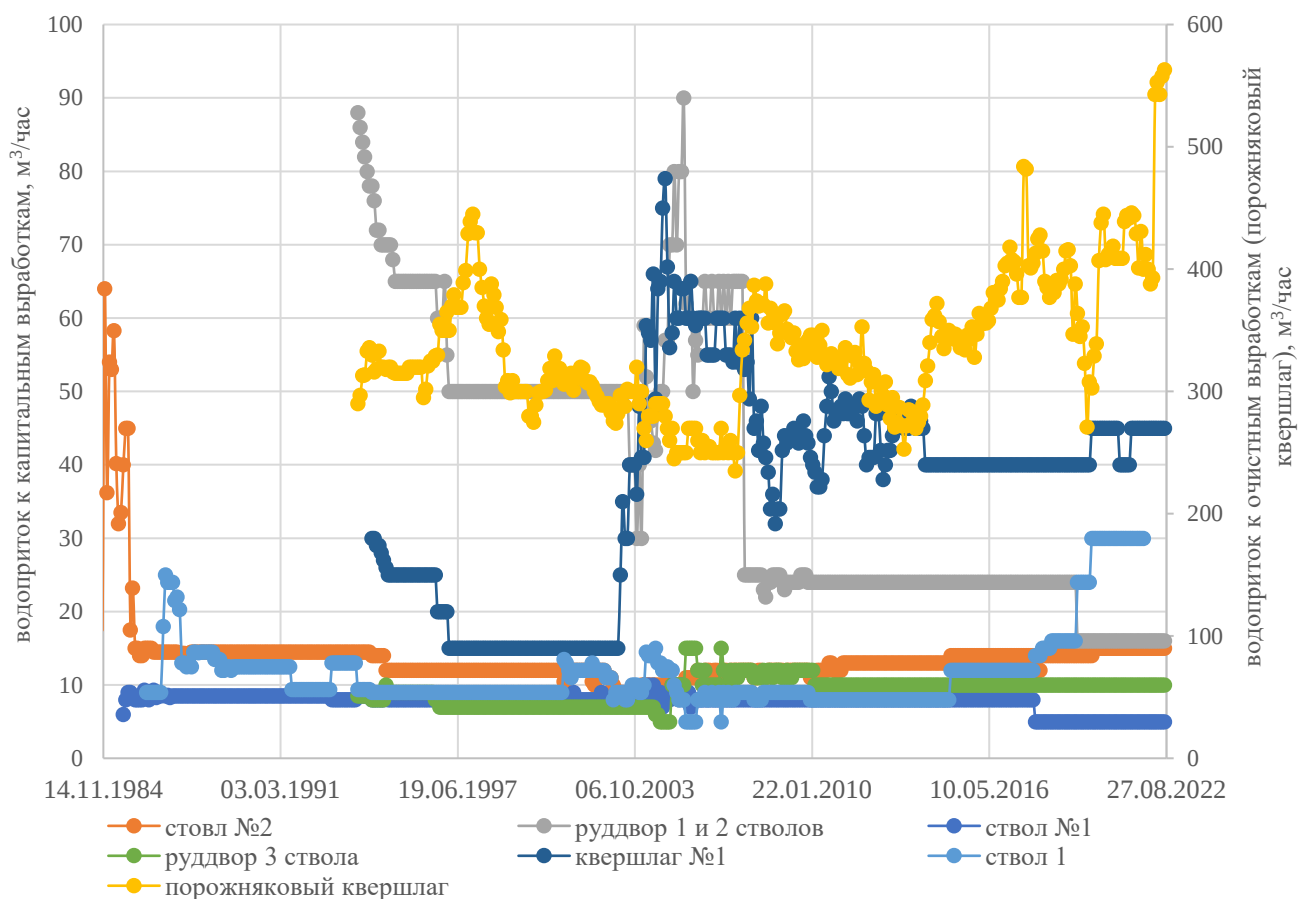


Рисунок 2.14 – Величина водопритока к отдельным участкам рудника (составлено автором)

В целом, средний водоприток в рудник вырос с 1992 года (400 м³/час) по 2022 г. (680 м³/час) на 70% (рис. 2.15).

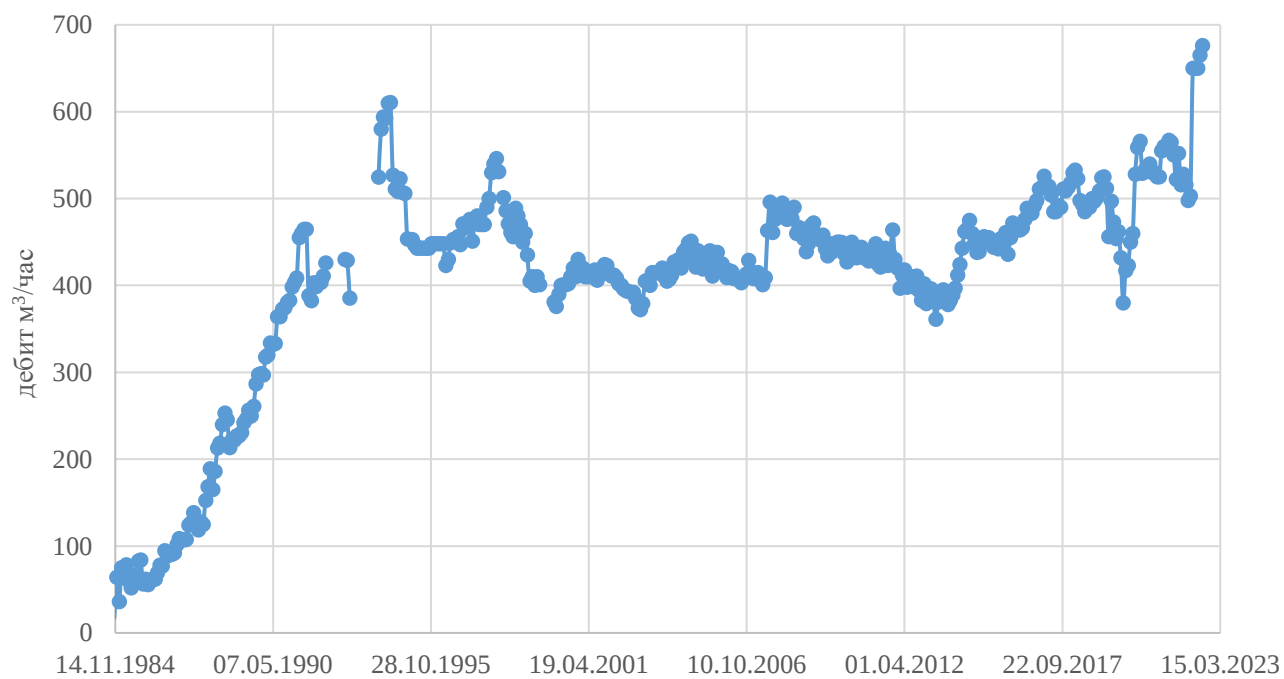


Рисунок 2.15 – Хронологический график изменения суммарного водопритока в рудник (составлено автором)

Очевидно, что такие объемы дренирования оказывают влияние на естественные уровни подземных вод. В то же время, связь водопритока с поверхностными водами и атмосферными осадками ввиду глубины отработки 600 м и наличия как региональных, так и локальных водоупоров в разрезе не наблюдается (рис. 2.16).

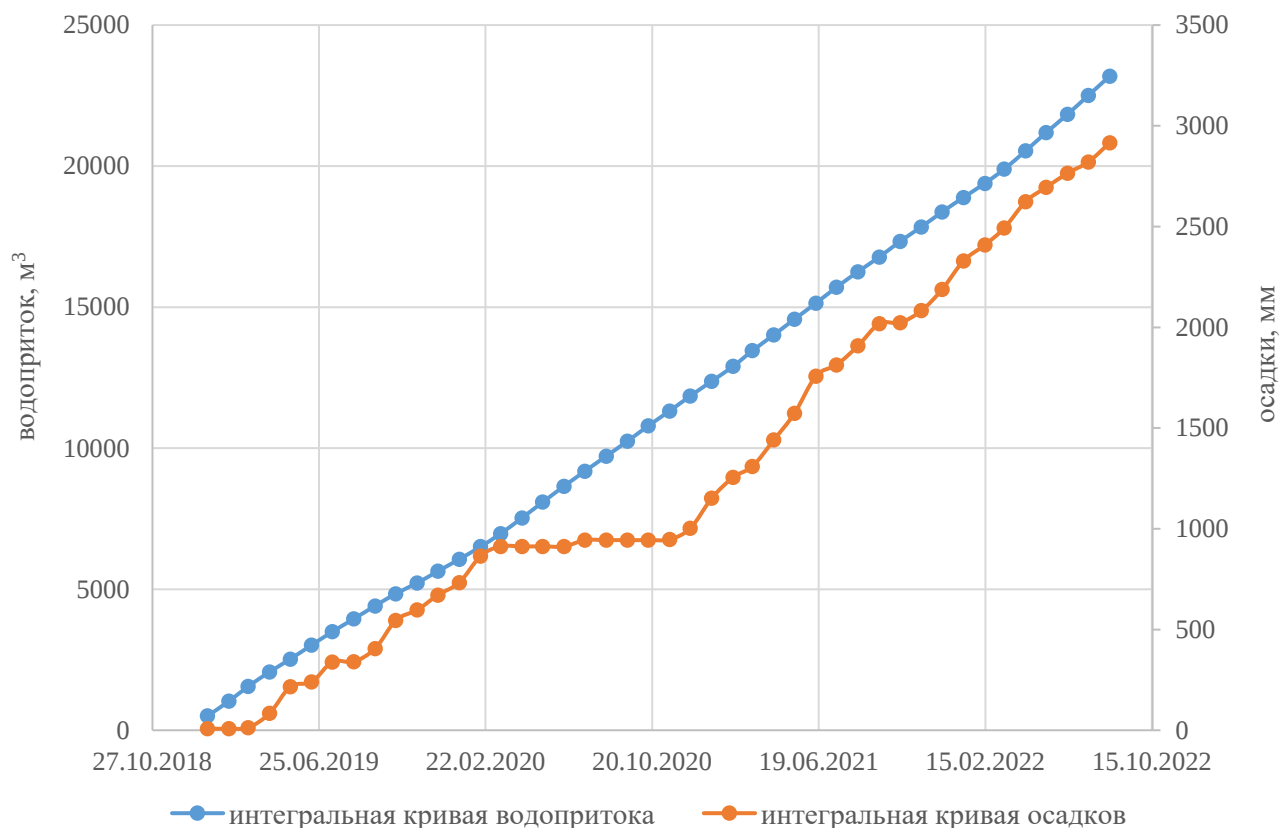


Рисунок 2.16 – Совмещенный график интегральных кривых осадков и суммарного водопритока в рудник (составлено автором)

Гидрогеологический участок Яковлевского ГОКа осуществляет наблюдения за изменениями уровней подземных вод в водоносных горизонтах нижнего и верхнего комплекса, разделённых региональным бат-байосским водоупором. Наблюдения велись с момента начала промышленной выемки руды (2006 г) по 30 скважинам, часть из которых в настоящее время выведены из строя (рис. 2.17).

Графики хронологического изменения уровней подземных вод иллюстрируют, что руднокристаллический водоносный горизонт характеризуется стационарным режимом, уровни которого с 2006 по 2022 гг. стабильно снижаются по линейному закону и определяются лишь фронтом и глубиной ведения горных работ. При этом нет четких закономерностей указывающих на фильтрационные неоднородности пород фундамента. Можно лишь заметить, что скважины 610 и 642, находящиеся ближе всего к горным выработкам имеют более низкие отметки (рис. 2.18).

Ситуация в НВГ резко отличается от РВГ. Из хронологических графиков изменения уровней в горизонте во время эксплуатации месторождения можно ещё раз заметить, что существует различие в фильтрационных параметрах лежачего и висячего бока, о котором можно судить по колебаниям и общему снижению уровней в скважинах от дренажного эффекта рудника (рис. 2.19).

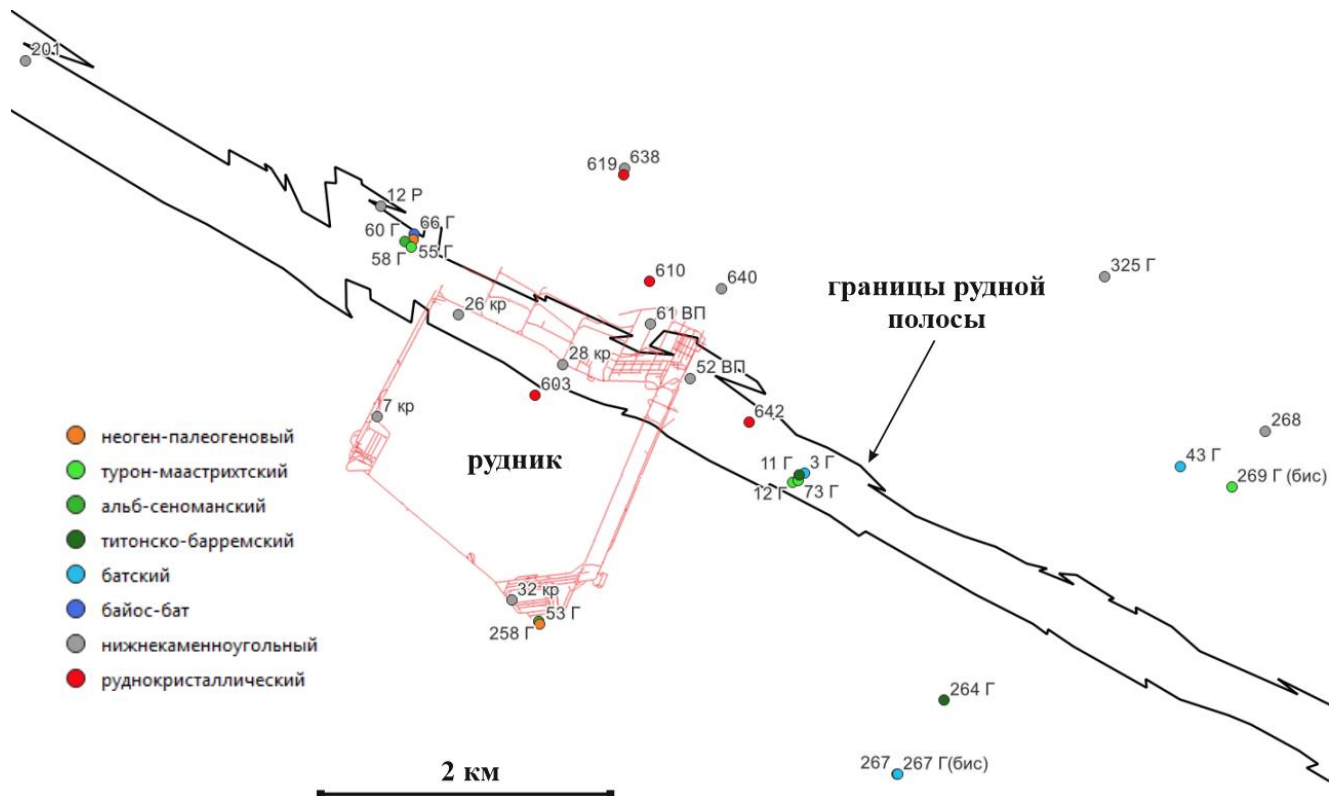


Рисунок 2.17 – Фонд наблюдательных гидрогеологических скважин в период эксплуатации рудника 2007-2022 гг. (составлено автором)

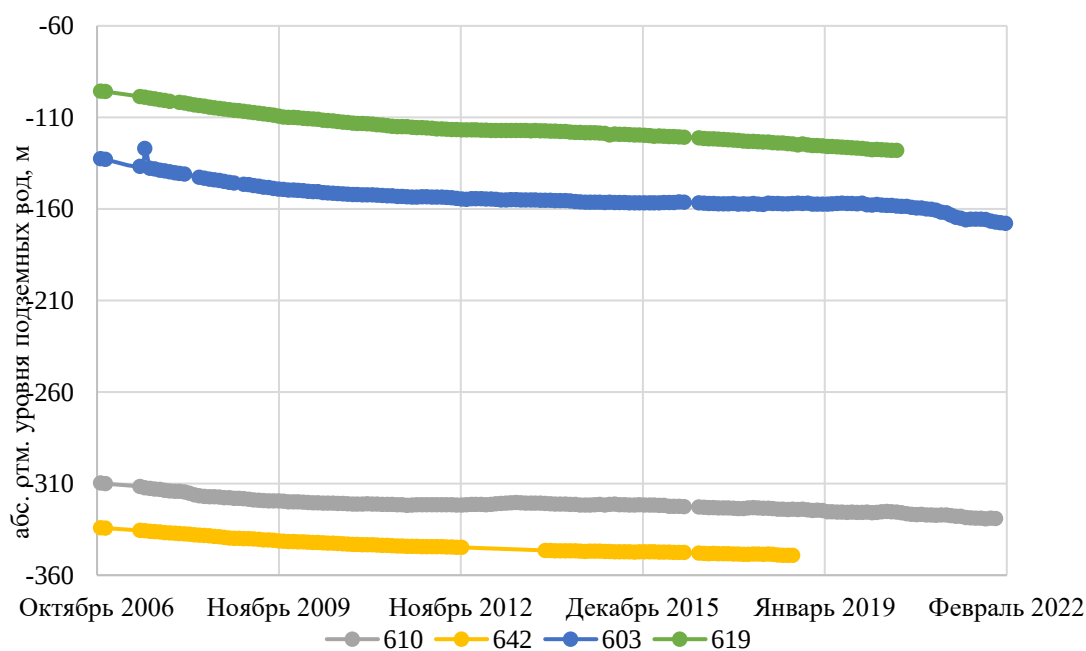


Рисунок 2.18 – Хронологический график изменения уровней подземных вод в РВГ по скважинам (составлено автором)

Группа скважин, располагающаяся непосредственно над очистным пространством и висячем боку, имеет более низкие отметки и чувствительнее реагирует на работу дренажной системы рудника, в то время как скважины лежачего бока (32 кр, 7 кр и 267 Г) хоть и имеют понижения порядка 30 м от естественного уровня, но слабо подвержены влиянию.

Скважина 201, расположенная на северо-западе, несмотря на её положение над рудной полосой имеет сходство с режимом скважин лежачего бока, что указывает на вероятное смещение в её пределах границ слабопроницаемых пород НВГ в северо-восточную сторону.

Максимальные падения уровней наблюдаются в непосредственной близости от очистного пространства (скв. 28 кр, 26 кр и 640), где понижения от естественного уровня достигают 130-140 м.

Резко выделяемые подъёмы уровней подземных вод НВГ в группе скважин висячего бока в 2011-2014 гг. и 2019-2021 гг. связаны с перекрытием высокодебитных дренажных скважин, пробуренных в водозащитную толщу. Данное обстоятельство справедливо ввиду того, что совокупный дебит дренажных скважин играет одну из ведущих ролей в динамике изменения общего водопритока в рудник (рис. 2.20).

Очевидно, что существует прямая гидравлическая связь между руднокристаллическим и нижнекаменноугольным водоносными горизонтами. Так, снижение дренируемого объема подземных вод к 2013 г. на $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ привело к подъёму уровней в НВГ над очистным пространством на 30 м. Аналогичная ситуация произошла и в 2019 г.

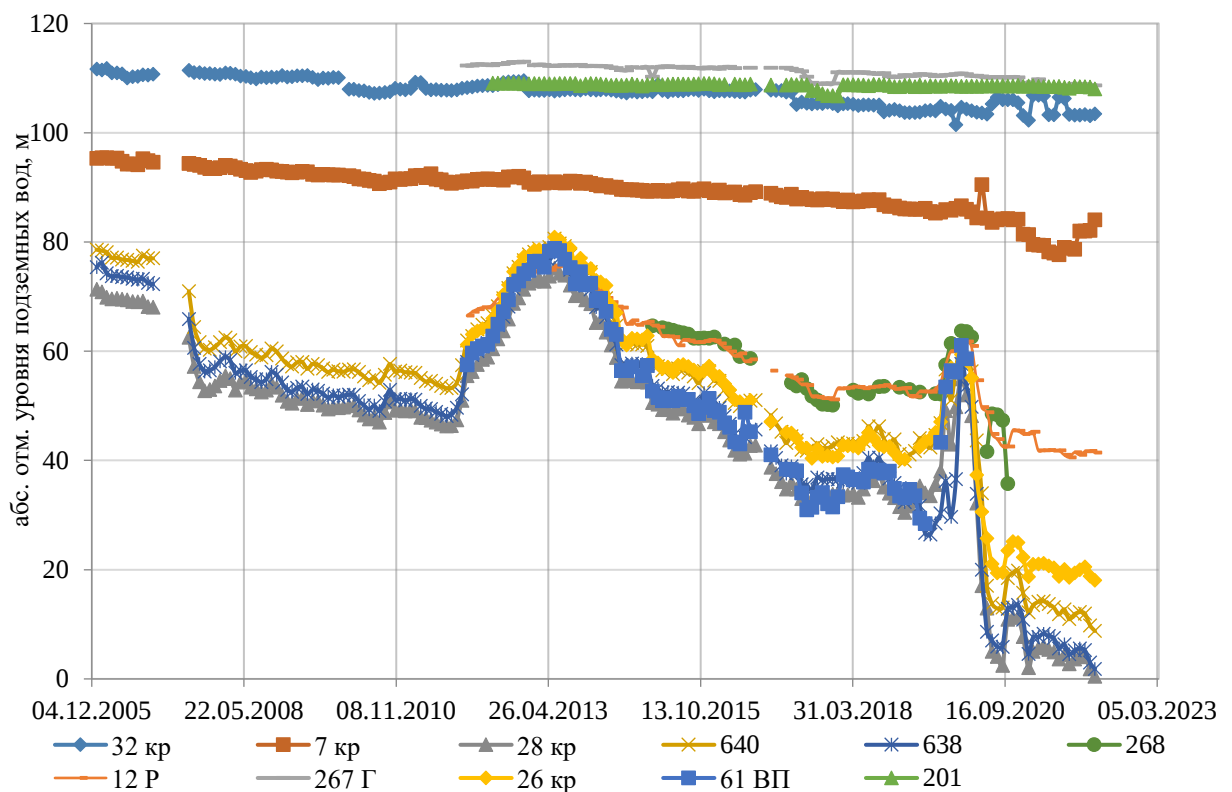


Рисунок 2.19 – Хронологический график изменения уровней подземных вод в НВГ (составлено автором)

Наблюдения за режимом в батском водоносном горизонте производятся по трём скважинам, расположенным на удалении 0,5-2 км на восток от рудника (рис. 2.17).

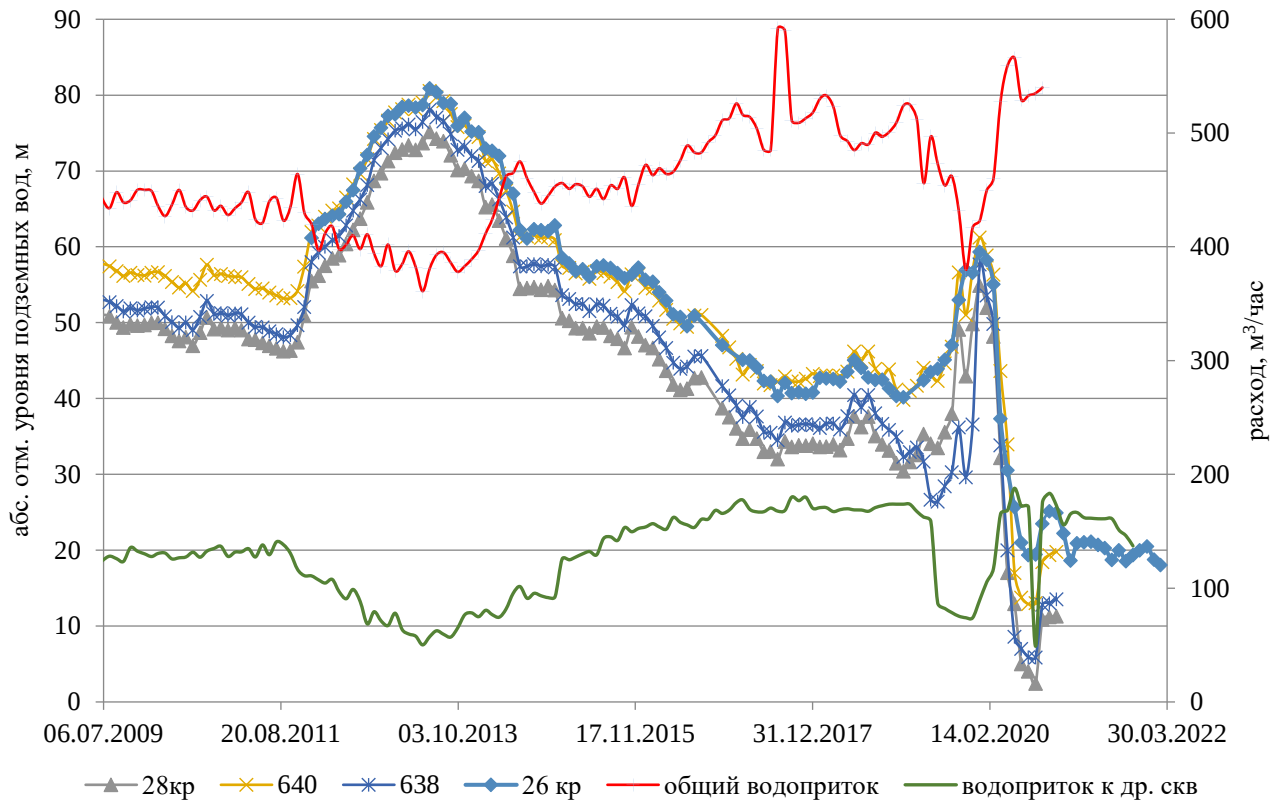


Рисунок 2.20 – Хронологический график сопоставления изменения уровней подземных вод в НВГ с водопритоком в рудник и к дренажным скважинам (составлено автором)

Динамика колебаний уровней подземных вод в батском горизонте схожа с байосс-батским водоупором и титонско-барремским слабоводоносным комплексом (рис. 2.21). Данное обстоятельство часто служит причиной объединения их в одну гидравлическую систему – нижнюю часть верхнего комплекса. Несмотря на то, что подземные воды этой системы на равном удалении от выработок обладают понижениями в 2 раза меньшими в сравнении с НВГ, на них по-прежнему сохраняется сильное влияние дренажной системы рудника, что можно заметить по характерным участкам 2011-2013 гг. и 2019-2021 гг. Вместе с тем, время отклика на изменения совокупного дебита дренажных скважин рудника увеличено на 3-6 месяцев. На 2022 г. максимальные понижения напоров в данной системе водоносных горизонтов составляют 60-80 м.

Режим вышележащих апт-сеноманского и турон-маастрихтского водоносных горизонтов подвергается более слабому влиянию рудника: в динамике изменения их уровней в характерные периоды колебаний дебитов дренажных скважин не прослеживается заметных повышений (рис. 2.22). Несмотря на отсутствие резких колебаний уровней, сохраняется общая депрессия как на фоне понижения от водозаборов в г. Харьков и г. Курск, так и от влияния рудника. Ввиду сильно выположенной в разрезе депрессии от водозаборов ближайших крупных

городов, на участке исследований сохраняется среднее понижение 25 м. Вероятно, оставшееся понижение уровней в размере до 5 м вызвано питанием нижележащих водоносных горизонтов под действием сформированного техногенного градиента нисходящей фильтрации.

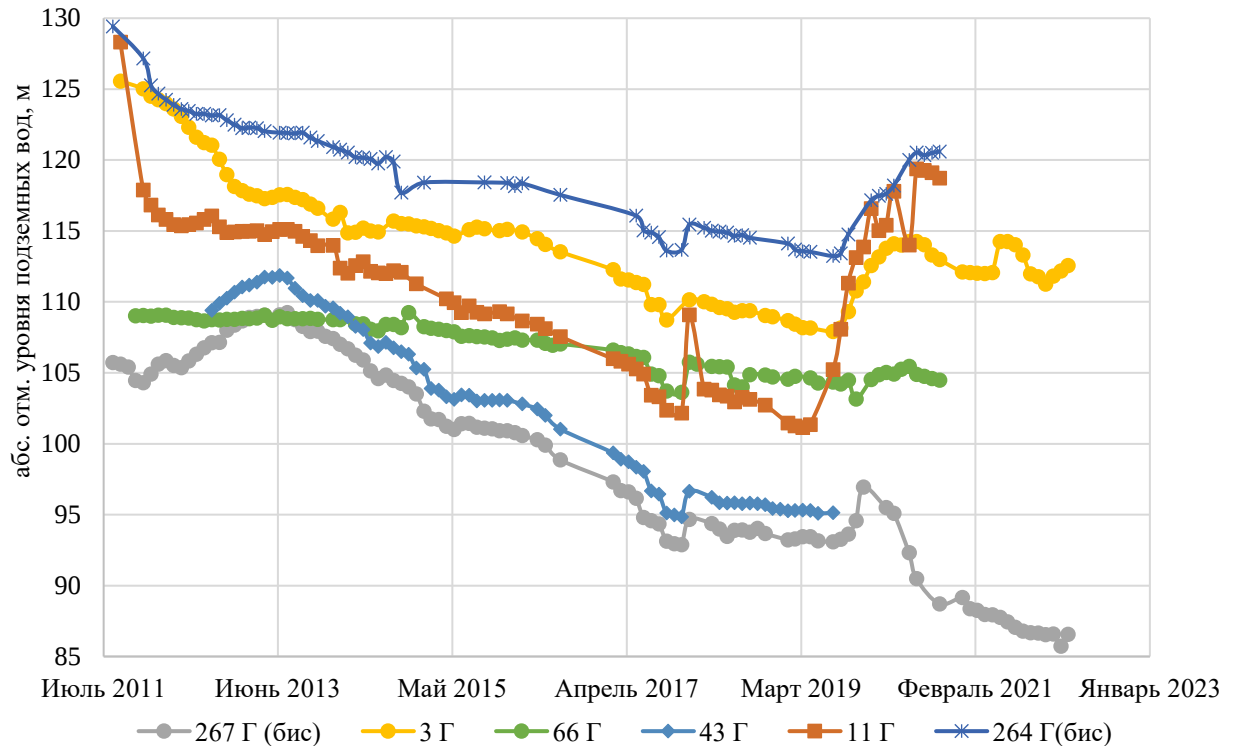


Рисунок 2.21 – Хронологический график изменения уровней подземных вод в наблюдательных скважинах байосс-батского, батского и титонско-барремского гидрогеологических стратонов (составлено автором)

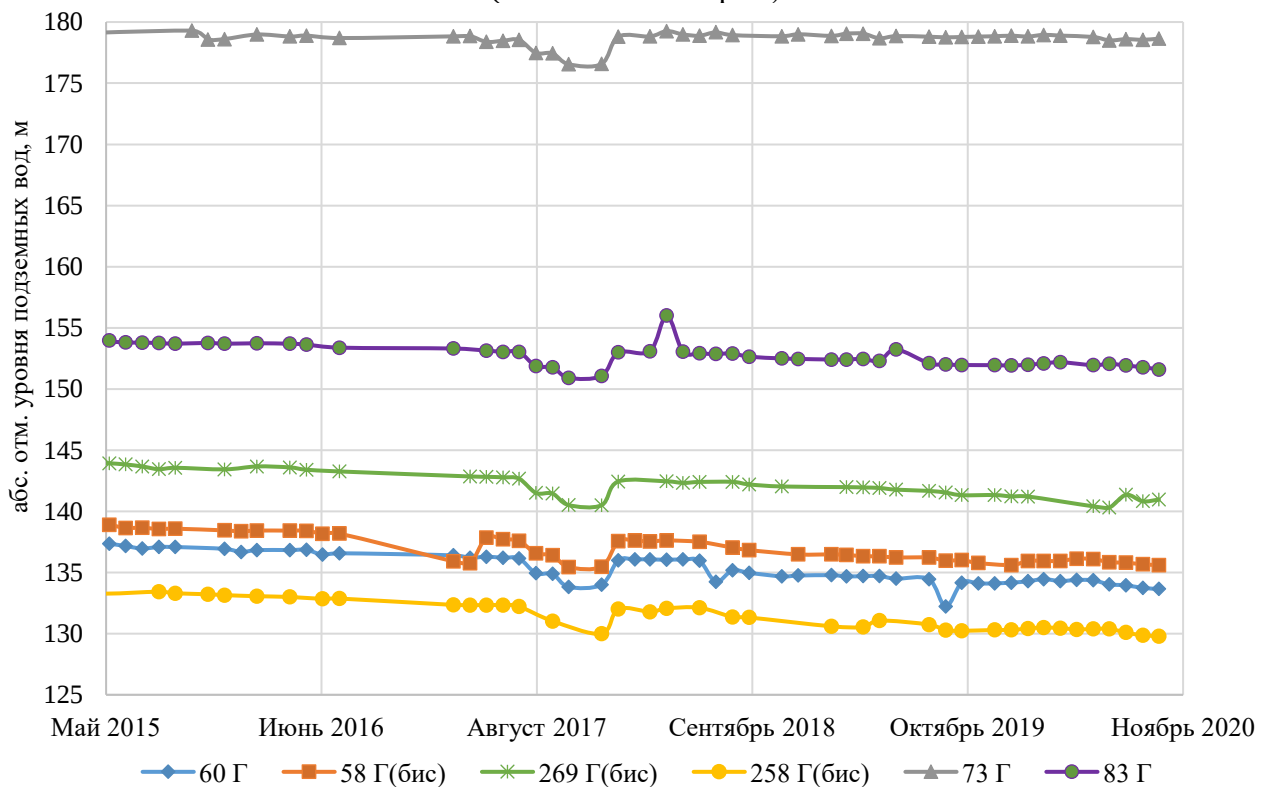


Рисунок 2.22 – Хронологический график изменения уровней подземных вод в апт-сеноманском и турон-маастрихтском водоносных горизонтах (составлено автором)

Уровни в безнапорном неоген-палеогеновом водоносном горизонте не подвержены сильному влиянию рудника и сохраняют свои естественные положения на абсолютных отметках 197-203 м. Наблюдения за напорами в горизонте велся по двум скважинам (рис. 2.23).

В целом, можно заключить, что техногенный режим подземных вод участка исследований во многом определяется эксплуатацией Яковлевского рудника, который выступает в роли районной дрены средней производительностью на 2022 г 680 м³/ч.

На формирование водопритока к горным выработкам особое влияние оказывают воды руднокристаллического и нижнекаменноугольного водоносных горизонтов нижнего комплекса. Воды верхнего комплекса реагируют на дренажный эффект рудника с задержкой минимум в 3-6 месяцев, понижение их уровней имеют существенно меньшие значения (минимум в 2 раза) и участвуют в формировании водопритока к горным выработкам опосредованно, в результате рассредоточенного питания НВГ в зоне сформированной техногенной области депрессии.

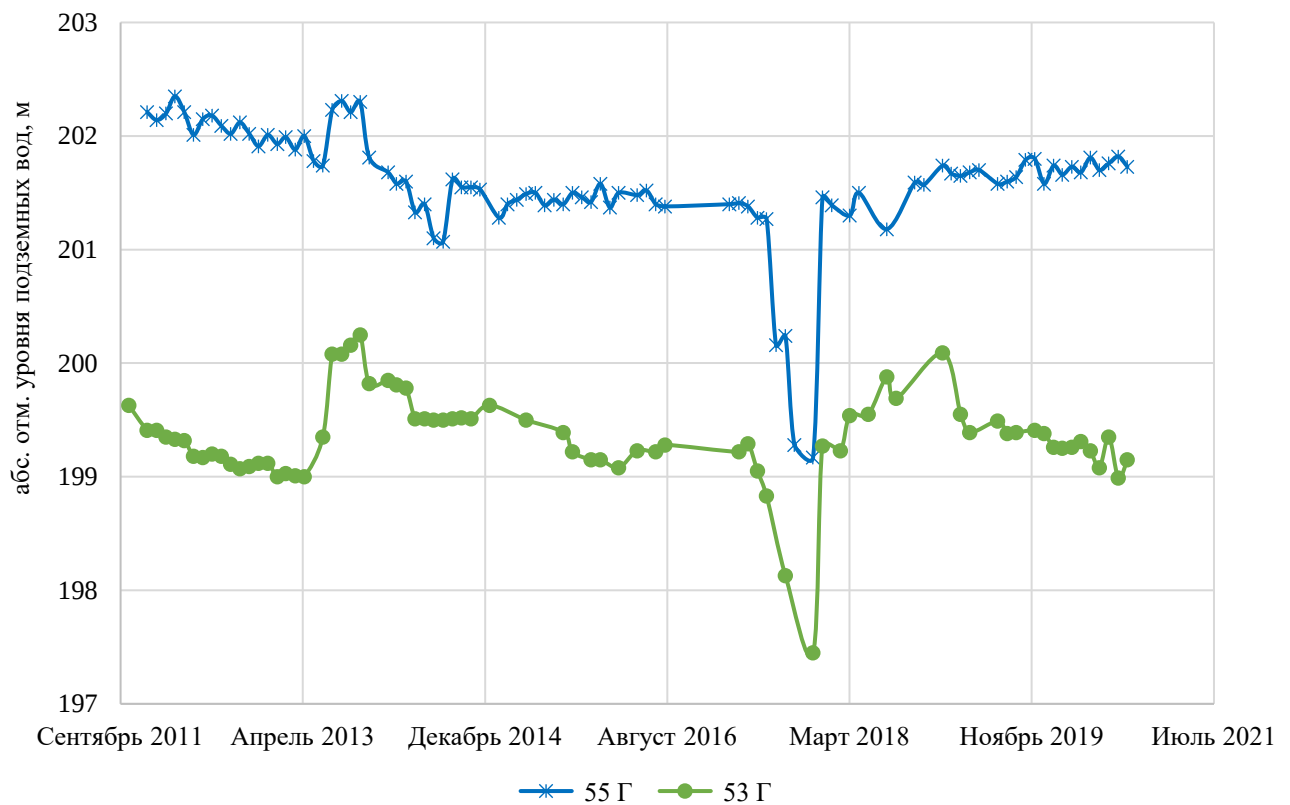


Рисунок 2.23 – Хронологический график изменения абс. отметок уровней подземных вод в неоген-палеогеновом водоносном горизонте на территории месторождения (составлено автором)

2.2 Методология

2.2.1 Теоретические сведения о методах научных исследований

Поднимая вопрос о методических подходах при изучении фундаментальных или прикладных вопросов в рамках работы над диссертацией, следует обратиться к общей

структуре научных знаний, которую разные исследователи приводят в качестве наглядной диаграммы (рис. 2.24) [87].

Как видно из диаграммы, методология является неким подспорьем при исследовательской деятельности любой науки, на принципы которой должен опираться исследователь, а также необходимым, но не достаточным звеном этой науки, при грамотном использовании которой в совокупности с другими инструментами знания возрастает шанс получения объективно результата.

В общем случае под **методологией** (из греч. учении о способах) понимается система принципов и подходов исследовательской деятельности, на которые опирается исследователь в ходе получения и разработки знаний в рамках конкретной дисциплины. При этом методология служит обеспечению процесса познания совокупностью строго выверенных и прошедших апробацию принципов, методов, правил и норм. Очевидно, что для достижения успеха в исследовательской деятельности ученому необходимо овладеть этим учением о способах.



Рисунок 2.24 – Структура научного знания по В.С. Ледневу [87]

Распространено также понимание методологии, как учения об организации – совокупности действий или процессов, которые ведут к образованию и совершенствованию взаимосвязей между дифференцированными частями целого, их упорядоченности и согласованности между собой для реализации какой-либо цели.

Методы научного исследования в общем случае можно разделить на эмпирические и теоретические, при этом совместно они порождают эмпирико-теоретический метод. Для демонстрации иерархической схемы методов исследований целесообразно обратиться к рисунку 2.25 [87].

С рисунка видно, что наряду с общенаучными и всеобщими методами, используемыми во многих науках, существуют конкретно-научные (частные) методы, привлекаемые исследователями для определенных целей в конкретной науке. Например, фациальный метод в региональной геологии, служащий для реконструкции обстановок осадконакопления в прошлых периодах истории Земли, результатом которого являются карты палеореконструкций конкретных территорий.



Рисунок 2.25 – Классификация методов научных исследований по В.С. Ледневу [87]

Очевидно, что грамотный выбор и использование методических подходов при работе над диссертацией способствует постановке и проведению эксперимента, получению достоверных данных.

2.2.2 Виды методических подходов в рамках диссертационной работы

В диссертационной работе были использованы теоретические и эмпирические методы, среди которых как всеобщие и общенаучные, так и частные (конкретно-научные) методы, способствующие достижению поставленной цели и решению приведённых задач.

При прохождении производственной стажировки на Яковлевском месторождении среди общенаучных методов использовались наблюдение, описание и измерение: производилась гидрогеологическая съемка капитальных и очистных выработок. Во время обследования рудника на маршрутах в течении 2-х недель производились наблюдения, описания и измерения по следующим видам работ:

- фиксировались все участки водопроявлений в выработках, их характер (излив, капез из скважин, шпуров, трещин), замеренный или визуально оцененный дебит, запах, цвет, инструментальные замеры минерализации воды кондуктометром HANNA HI 98312;
- оценивалось внешнее состояние крепи или пород на участках высачивания вод, площадь участков обводнения и места подтопления горных выработок, вывалы, обрушения, куполение и прогибание кровли;
- состояние водосборников и водоотводных канав, замеры минерализации и дебитов наклонных дренажных скважин;
- состояние участков действующих и ранее отмеченных прорывов воды, замеры её минерализации и дебитов;
- описывались тектонические нарушения, трещиноватость пород, их генетическая принадлежность, заполнитель трещин;
- проводилось измерение величин оседаний реперов, смонтированных в кровле - 375 горизонта, и уровней подземных вод в гидронаблюдательных скважинах режимной сети месторождения;
- фиксировалось направление течения воды в канавках в почве выработок, расходы, и минерализация рудничных вод, производительность действующих насосных установок.

Методы наблюдения, описания и измерения использовались в соответствии с апробированными алгоритмами проведения гидрогеологической съемки месторождений, описанных в методических указаниях по гидрогеологическому обслуживанию рудников [34].

Общие методы анализа, обобщения и синтеза были использованы как при работе с результатами ранее проведённых исследований другими учеными, так и при обработке данных, собранных во время полевого этапа автором работы.

Методы абстрагирования и идеализации использовались в работе совместно с частными методами геофильтрационного моделирования и гидрохимическим методом при схематизации

и типизации условий фильтрации подземных вод. Они позволили разграничить несущественные стороны, свойства и связи объекта исследования от его существенных, закономерных признаков, что будет реализовано в процессе геофильтрационного моделирования.

Целесообразно остановиться на использованных в работе частных (конкретно-научных) методах подробнее.

Под моделированием понимается процесс создания (построения) и использование в различных целях модели – материально, знаково или как-либо иначе реализованная система, которая, отображая или воспроизводя реальный объект, способна замещать его так, что её изучение позволяет получить новую информацию. В большинстве случаев моделирование способствует изучению таких объектов, прямой эксперимент над которыми невозможен или затруднен экономическими и другими факторами. Основной целью геофильтрационного моделирования является изучение поведения подземных вод в сложных естественных и техногенно-изменённых условиях, которые сложно оценить с помощью аналитических зависимостей [88].

В математическом моделировании имитация природных процессов осуществляется средствами языка математики и логики. Таким образом, математическая модель – это уравнение или система уравнений, описывающих наиболее существенные черты или свойства объекта. Используемые при этом уравнения включают коэффициенты (параметры) и переменные, которые позволяют описать свойства объекта и характер их изменения. Среди параметров модели выделяются взаимосвязанные и независимые. Число степеней свободы модели определяется количеством независимых параметров. Например, мерность модели соответствует числу независимых пространственных координат.

На сегодняшний день большинство программных пакетов для численного геофильтрационного моделирования реализуют решение дифференциальных уравнений фильтрации в конечных разностях, конечных элементах или конечных объёмах, когда частные производные в них заменяются конечными приращениями, а сами дифференциальные уравнения сводятся к системе алгебраических уравнений [89]. Именно решение конечно-объемных уравнений положено в основу используемого в работе программного обеспечения «НИМФА».

Математическое моделирование фильтрации основано на трёх основных уравнениях. Законе сохранения массы:

$$\frac{\partial(\rho p)}{\partial x t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = q, \quad (2.1)$$

где: m – пористость; ρ – плотность, кг/м³; t – время; $\vec{v}$ – скорость фильтрации, м/сутки.

Законе Дарси:

$$\vec{v} = \frac{K}{\mu} (\text{grad}P - \rho \vec{g}), \quad (2.2)$$

где: K – тензор абсолютной проницаемости породы; μ – динамическая вязкость флюида (воды); P – давление; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения.

Уравнении состояния:

$$m(P) = m_0 + \beta(P - P_0), \quad (2.3)$$

где: β – сжимаемость породы; m_0 – пористость при давлении P_0 .

Аппроксимация уравнения фильтрации с учётом конкретной модельной сетки производится путём подстановки (2.2) в (2.1) и интегрируя полученное уравнение по объёму ячейки (ΔV) с использованием формулы Гаусса-Остроградского [90]:

$$\frac{(m\rho)^{n+1} - (m\rho)^n}{\Delta t} \Delta V - \sum_{f=1}^{N_f} \left[\left(\rho \frac{K}{\mu} \right)^{n+1} (\text{grad}(P^{n+1}) - \rho \vec{g}) \right]_f \cdot \vec{n}_f \Delta S_f = Q_F \quad (2.4)$$

где: $Q_F = q\Delta V$ – приток массы жидкости в ячейку за единицу времени; суммирование ведётся по граням ячейки: $\vec{n}_f$ – нормаль к грани; ΔS_f – площадь грани.

Поля давления являются основными величинами, которые рассчитываются методом конечных объемов. Согласно опубликованным трудам разработчиков используемого ПО исходные дифференциальные уравнения фильтрации являются нелинейными, которые связываются между собой через скорость фильтрации, плотность и вязкость жидкости. Также учитывается зависимость пористости пород от давления. Алгоритм решения системы базовых уравнений основан на линеаризации системы конечно-объемных уравнений и последующего его решении. Линеаризация системы конечно-объемных уравнений выполняется относительно приращения давления. При этом в процессе счета образуются распределенные разреженные матрицы порядка $N+N_{\text{wells}}$ для фильтрации, (N – число ячеек сетки, N_{wells} – число скважин или других границ). В программном комплексе НИМФА система линейных алгебраических уравнений решается в параллельном режиме методами, реализованными в библиотеке LParSol, созданной в РФЯЦ-ВНИИЭФ [91].

Таким образом, в рамках моделирования производится замена на частные производные непрерывной в пространстве и времени функции напора (давления) на сеточную функцию, которая имеет определённые значения только в некоторых точках (узлах) пространства, расстояния между которыми определяется размерами ячеек модели. Данное обстоятельство справедливо и для временной координаты: весь рассматриваемый временной период

разбивается на конкретные интервалы, длительность которых определяется как целями, так и особенностями расчетного алгоритма программы.

Чем более дробной разбивкой обладает рассматриваемая область, тем более детальную информацию можно получить, однако, количество конечно-объемных уравнений также увеличится, что несёт определенную нагрузку на вычислительные элементы компьютера. Традиционно, параметры фильтрационного потока присваиваются центрам или узлам блоков пространственной разбивки.

Использованная методика геофильтрационного математического моделирования предусматривает несколько этапов [88]:

1. Информационное обеспечение численной модели. Данный этап является одним из определяющих качество и достоверность получаемых данных при моделировании. Часто бывает сложно определить степень достаточности исходных данных, однако, для большинства гидродинамических расчетов необходимы представления о рельефе дневной поверхности, гидрографической сети, климате, геометрии гидрогеологических стратонов, условиях их питания и разгрузки, фильтрационных параметрах, дебитах инженерных сооружений;

2. Составление математической модели – этап схематизации, то есть переход от реальных гидрогеологических условий к математическим выражениям фильтрации, отражающим основные (наиболее значимые) стороны геофильтрационного процесса. В процессе схематизации назначаются или определяются границы исследуемого участка с указанием характера гидродинамических условий на них. На основе известных закономерностей распределения фильтрационных параметров и структуры фильтрационного потока, производится разбивка области на блоки, число и размеры которых определяются требованием к точности расчета напоров и детальностью исходной информации. Задаются внутренние граничные условия и объекты, влияющие на структуру фильтрационного потока (дрены и т.д.);

3. Разработка вычислительного алгоритма и его реализация на языке программирования. На практике этот этап определяется выбором готового программного продукта для геофильтрационного моделирования, построением модели, выбором алгоритма решения и критериев сходимости получаемых результатов;

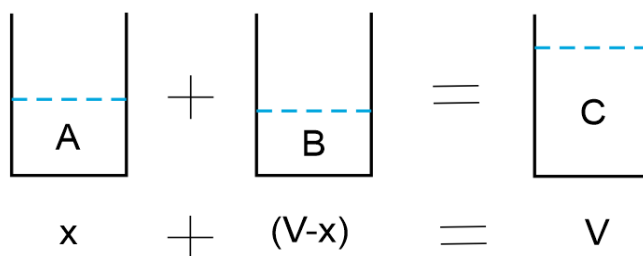
4. Калибровка модели. Этап заключается в решении обратной задачи, проведении вычислительного эксперимента по поиску и проверке фильтрационных параметров и условий на гидродинамических границах исходя из сведений о фактических значениях расходов и напоров подземных вод. При наличии данных по густой сети фильтрационных опробований также производится решение обратной задачи, верификация параметров, их генерализация;

5. Анализ результатов калибровки (верификационного эксперимента), позволяющий уточнить представления о модели и внести необходимые коррективы (возврат к пункту 4). После того как модель начинает отражать все существенные и необходимые в рамках задачи стороны реального объекта, можно переходить к следующему этапу;

6. Прогнозное моделирование, заключающееся в целевом использовании модели.

С целью оценки балансовых составляющих формирования водопритока к очистным горным выработкам были использованы положения гидрогеохимического метода в части смешения и концентрирования подземных вод, определения направления фильтрации подземного потока в процессе перетекания. В общих положениях гидрогеохимический метод основан на знаниях о закономерностях образования, концентрирования, миграции и осаждения (высвобождения) химических элементов и газов, связанных с подземными водами, то есть формировании и эволюции химического состава подземных вод в различных условиях.

В работе использован объемно-весовой метод, позволяющий по известным значениям получаемого при смешении объема вод и концентрации в нем компонента, а также концентраций компонента в каждой из составляющих итогового притока определить долю каждой из них в общем балансе. Для каждой пары смешиваемых растворов составлялось уравнение, сущность которого состоит в равенстве суммы произведений концентрации компонента (А и В) и его объема в смешиваемых растворах и произведения концентрации компонента в итоговой смеси (С) с её объемом (рис. 2.26). Данное уравнение не имеет физического смысла, но широко используется при решении задач на смешение растворов.



$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{|c|} \hline \text{A} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{B} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{C} \\ \hline \end{array} \\
 x + (V-x) = V
 \end{array}$$

Рисунок 2.26 – Схема поиска объема каждой составляющей при смешении двух растворов, где А, В и С – концентрации вещества, V – объем получившегося при смешении раствора (составлено автором)

В работе использовались статистические методы обработки данных при поиске функциональной зависимости между факторами. В качестве критерия целесообразности использования конкретного вида функциональной кривой был использован стандартный встроенный в программный пакет Microsoft Excel метод наименьших квадратов, позволяющий сравнивать величину коэффициента детерминации и выбирать наиболее точно описывающую зависимость функцию (с наименьшей долей разброса рассматриваемой величины). Однако, для

известных видов зависимостей факторов выбирался теоретически обоснованный вид регрессионного уравнения тренда.

В качестве меры (силы и направления) связи между двумя переменными использовался коэффициент парной корреляции. В соответствии со специальной литературой, зависимость может быть использована для прогнозов и практических расчетов при условии превышения модуля коэффициента корреляции значения 0,7 [92, 93]. Связь с модульными значениями в диапазоне 0,5-0,7 характеризуется как средняя, однако, в ряде случаев тоже может быть использована при прогнозах [94]. Более низкие значения характеризуют слабую или очень слабую корреляцию и не используются в практических целях.

Например, при линейной зависимости коэффициент парной корреляции (r) для двух факторов (x и y) рассчитывается по следующей формуле:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2.5)$$

При этом, коэффициент детерминации R^2 , получаемый на графиках в программе по методу наименьших квадратов, может быть выражен через коэффициент корреляции как его квадрат и наоборот.

Вторым критерием применимости полученных уравнений регрессии являлась проверка коэффициентов корреляции на критические значения для различных уровней значимости и различного числа степеней свободы (размера выборки) согласно таблице (рис. 2.27) [95]. Односторонний или двусторонний критерий выбирался исходя из наличия теоретической предпосылки (гипотезы) о направлении корреляции: односторонний – при известной, двусторонний при неизвестной.

Стоит отметить, что для самых малых использованных в работе выборок ($N=6$) критерий критических коэффициентов корреляции при значимости 0,05 также близок к рекомендуемому в специальной литературе и составляет 0,73. Для больших выборок, анализируемых в работе, данный критерий оказался более мягким относительно рекомендуемого в литературе [92, 93].

df = (N-2)	Уровень значимости для двустороннего критерия				
	0,05	0,25	0,01	0,005	0,0005
	Уровень значимости для одностороннего критерия				
	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,98769	0,99692	0,9995	0,999877	0,9999988
2	0,90000	0,95000	0,980	0,990000	0,99900
3	0,8054	0,8783	0,934	0,95873	0,99116
4	0,7293	0,8114	0,882	0,91720	0,97406
5	0,6694	0,7545	0,833	0,8745	0,95074
6	0,6215	0,7067	0,789	0,8343	0,92493
7	0,5822	0,6664	0,750	0,7977	0,8982
8	0,5494	0,6319	0,715	0,7646	0,8721
9	0,5214	0,6021	0,685	0,7348	0,8471
10	0,4973	0,5760	0,658	0,7079	0,8233
11	0,4762	0,5529	0,634	0,6835	0,8010
12	0,4575	0,5324	0,612	0,6614	0,7800
13	0,4409	0,5139	0,592	0,6411	0,7603
14	0,4259	0,4973	0,574	0,6226	0,7420
15	0,4124	0,4821	0,558	0,6055	0,7246
16	0,4000	0,4683	0,542	0,5897	0,7084
17	0,3887	0,4555	0,529	0,5751	0,6932
18	0,3783	0,4438	0,515	0,5614	0,6787
19	0,3687	0,4329	0,503	0,5487	0,6652
20	0,3598	0,4227	0,492	0,5368	0,6524

Рисунок 2.27 – Критические значения коэффициента корреляции Пирсона (r) для различных уровней значимости и размеров выборки (N) [95]

Таким образом, вид функции, наиболее полно описывающий характер связи между рассматриваемыми факторами, выбирался исходя из теоретических предпосылок или наибольшего коэффициента детерминации, полученного по методу наименьших квадратов, в то время как модуль коэффициента корреляции более 0,7 использовался как критерий целесообразности использования полученной зависимости для составления прогноза водопритока.

Вместе с тем, соответствие эмпирических данных расчетным по уравнению регрессии для получения ожидаемого интервала разброса прогнозируемых значений водопритока оценивалось по средней относительной ошибке аппроксимации A, рассчитываемой по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - y_p}{y} \right| \cdot 100 \quad (2.6)$$

где: y – эмпирическое значение; y_p – значение, полученной по уравнению регрессии; n – количество измерений.

Следует отметить, что применимость регрессионных моделей, полученных по эмпирическим данным, для прогнозирования искомых величин рекомендуется выполнять на период ~25 % от рассмотренного (на основе которого получена закономерность) [93].

ГЛАВА III ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОПРИТОКА

3.1 Факторы формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника

При освоении подземного пространства Яковлевского месторождения к горным выработкам рудника формируется приток подземных вод в количестве 680 м³/ч (2022 г.). Среди групп факторов, влияющих на его формирование, можно выделить как естественные, так и искусственные (техногенные).

В условиях Яковлевского месторождения к естественным факторам можно отнести:

- геологическое строение территории (структурные особенности);
- гидрогеологическая характеристика местности (внутренние и внешние границы области фильтрации, фильтрационные параметры горных пород и их неоднородность);
- климат и рельеф, влиянием которых на водопритоки в рудник в условиях данной задачи можно пренебречь (подробнее в разделе 2.1.4).

К искусственным факторам относятся:

- фронт ведения горных работ (совокупная площадь и глубина сети горных выработок – дрен);
- техногенная нарушенность массива горных пород при подработке, приводящая к увеличению их проницаемости.

Следует отметить, что влияние фронта ведения горных работ применительно к Яковлевскому руднику очень слабо ввиду отработки руд послоевой системой с закладкой выработанного пространства. Более того, первым делом формируется контур ведения горных работ «ограничивающими» очистное пространство капитальными выработками на -370 и -425 гор., который слабо изменчив на всем периоде отработки первого этажа каждого блока [96, 97]. Данное обстоятельство сводит к минимуму влияние этого фактора на водоприток.

Таким образом, наибольшим влиянием обладают факторы, связанные с геолого-гидрогеологическими особенностями строения территории и техногенной нарушенностью массива. При этом, на этапах разведки, строительства и эксплуатации месторождения естественным факторам уделялось гораздо больше внимания. Как отмечалось в I и II главах, с высокой детальностью изучены геологическое строение территории, фильтрационные параметры горных пород и особенности их распределения.

Как итог, по результатам геологоразведочных работ, проведённых до периода проектных объемов добычи руды, определённые естественные фильтрационные параметры легли в основу всех проектных решений по оставлению водозащитного целика, отключению дренажной системы скважин с поверхности и переход на подземную систему осушения [96].

Корректировки проекта в 2018 г, а также другие разрабатываемые технические проекты, например, по обратной закачке очищенных дренажных вод в НВГ, также содержат в своей основе положения о неизменности фильтрационных параметров подрабатываемого массива горных пород.

Такие подходы сформировали ряд традиционных положений о естественных гидрогеологических условиях Яковлевского рудника:

- гидравлическая связь НВГ и РВГ незначительна;
- в схеме формирования водопритока к горным выработкам ведущую роль играет РВГ;
- коэффициент фильтрации разделяющего слоя (углистых и глинистых прослоев) в основании НВГ равен $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут;

Однако, такие положения справедливы исключительно до начала выемки полезного ископаемого в проектных объемах или вне зоны техногенной нарушенности массива, что закономерно ставит вопрос об уточнении схемы формирования водопритока к горным выработкам, оценке и прогнозу балансовых составляющих в общем водопритоке в рудник, уточнению фильтрационных параметров водозащитной толщи.

Предпосылками к данному тезису служат собранные и систематизированные данные о химическом составе подземных и рудничных вод, деформациях рудной потолочины и земной поверхности, а также объемы водопритоков, поступающих к различным участкам рудника.

3.1.1 Предпосылки увеличения проницаемости в кровле очистных выработок

Как известно, первичная и повторная подработка горных пород приводит к деформированию потолочины горных выработок, её оседанию под действием литостатического давления, вследствие чего естественное сложение массива нарушается, формируются зоны сдвижения горных пород [98, 99].

В связи с этим, в первую очередь анализировались данные об оседаниях реперов, смонтированных как в кровле водозащитной толщи (-375 гор.), так и на земной поверхности. Максимальные значения оседаний по реперам подземной и наземной станций иллюстрируют формирование зон разуплотнения в надрудном массиве горных пород (рис. 3.1). Как видно из диаграммы в каждом из рассмотренных годов с известными величинами оседаний происходит

отставание максимальных оседаний реперов поверхностной наблюдательной станции от подземной.

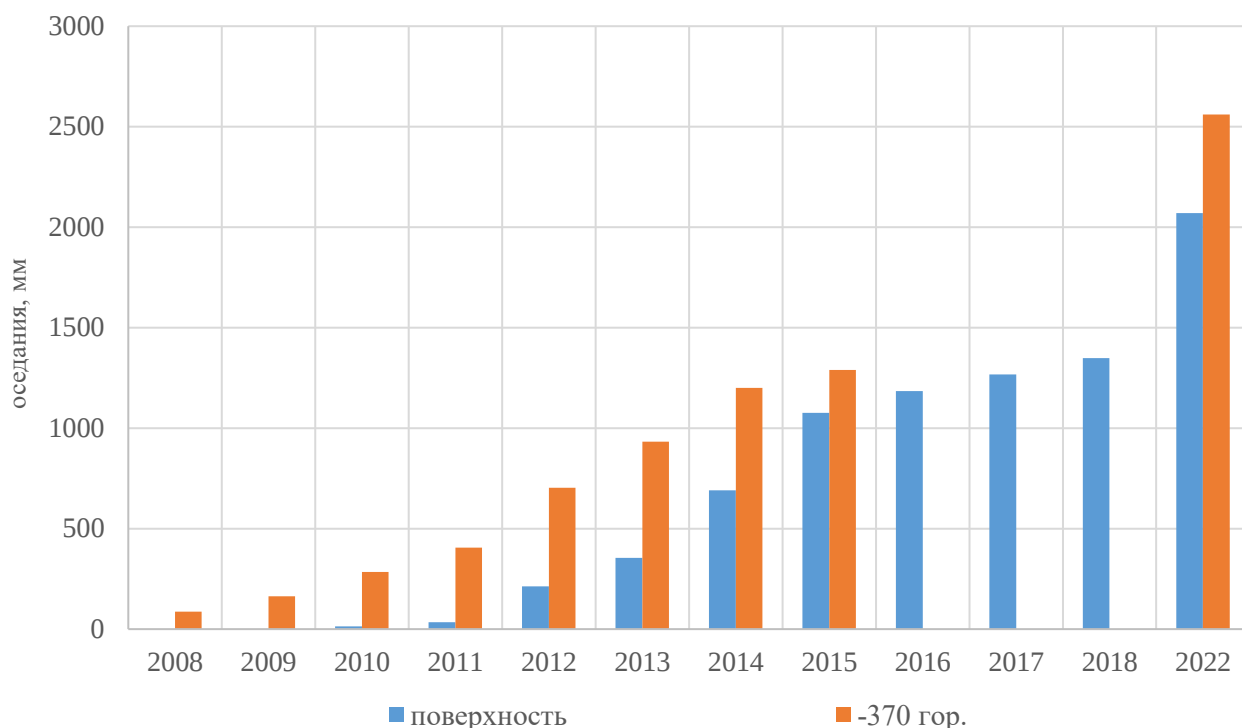


Рисунок 3.1 – Диаграмма распределения максимальных оседаний реперов наземной и подземной наблюдательных станций на 2008-2022 гг. (составлено автором)

Несмотря на то, что разница в деформациях распределена между всеми слоями горных пород, формирование зон разуплотнения происходит в том числе и в теле водозащитной толщи, что приводит к увеличению её проницаемости и, как следствие, повышению объемов перетекания из НВГ.

Результаты сопоставления оседаний реперов в кровле горизонта-375 м. с дебитами дренажных скважин также указывают на увеличение проницаемости пород над очистным пространством. С целью сопоставления данных показателей были выбраны участки, для которых соблюдалось условия наличия хронологического ряда замеров оседаний и дебитов, а также близкое расположение точек замеров друг к другу.

В качестве критерия близкого расположения дренажных скважин к реперам выступало расстояние, равное длине дренажной скважины, так как в пределах этой зоны вокруг возмущающих скважин при любых опытно-фильтрационных исследованиях происходят самые значительные изменения градиентов и скоростей фильтрации, что благоприятно сказывается на обнаружении влияния деформаций рудной потолочины на её проницаемость [100, 101].

Ввиду низкой преемственности маркшейдерских наблюдений за оседаниями реперов подземной станции и наличию двух периодов, в которые происходило отключение ряда дренажных скважин или их вывод из строя (2011-2014 гг. и 2019-2021 гг.), можно выделить лишь один участок, на котором наблюдения соответствуют предложенным критериям. Для

сопоставления выбраны репера №16, 17 и 18 и дренажные скважины №806, №791, расположенные на стыке 6 и 7 технологических блоков. Дебит скважины 806 для удобства сопоставления уменьшен в 10 раз.

Графики сопоставления в период с 2008 г. по 2011 г. иллюстрируют рост оседаний рудной потолочины во время увеличения водопритока к дренажным скважинам (рис. 3.2). При этом уровень подземных вод в НВГ в этот период снизился на 8 м, что также свидетельствует о снижении градиента нисходящего перетекания подземных вод из НВГ. Учитывая эти обстоятельства, наиболее вероятной причиной такого изменения гидрогеомеханических условий является увеличение проницаемости пород в кровле горных выработок при их деформировании.

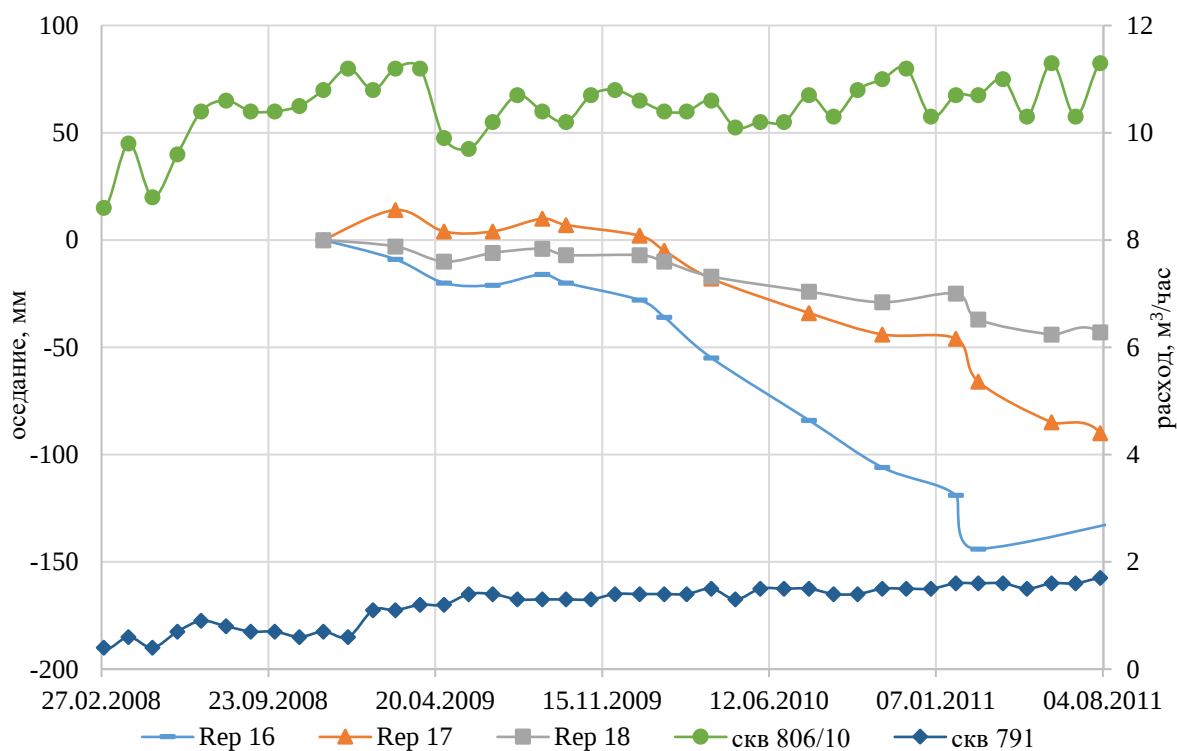


Рисунок 3.2 – График сопоставления оседания реперов и изменения дебита дренажных скважин, блок 6-7

Аналогичные зависимости наблюдаются в период 2015-2018 гг., когда после проведения технических работ на скважинах дебиты и оседания продолжили развиваться по такой же качественной закономерности (рис. 3.3).

Таким образом, в условиях снижения градиента нисходящей фильтрации происходит увеличение дренируемого скважиной объема подземных вод. Вместе с тем, увеличение дебитов скважин происходит на фоне роста оседаний рудной потолочины, что, согласно основному закону фильтрации Дарси, указывает на повышение проницаемости пород, слагающих водозащитную толщу.

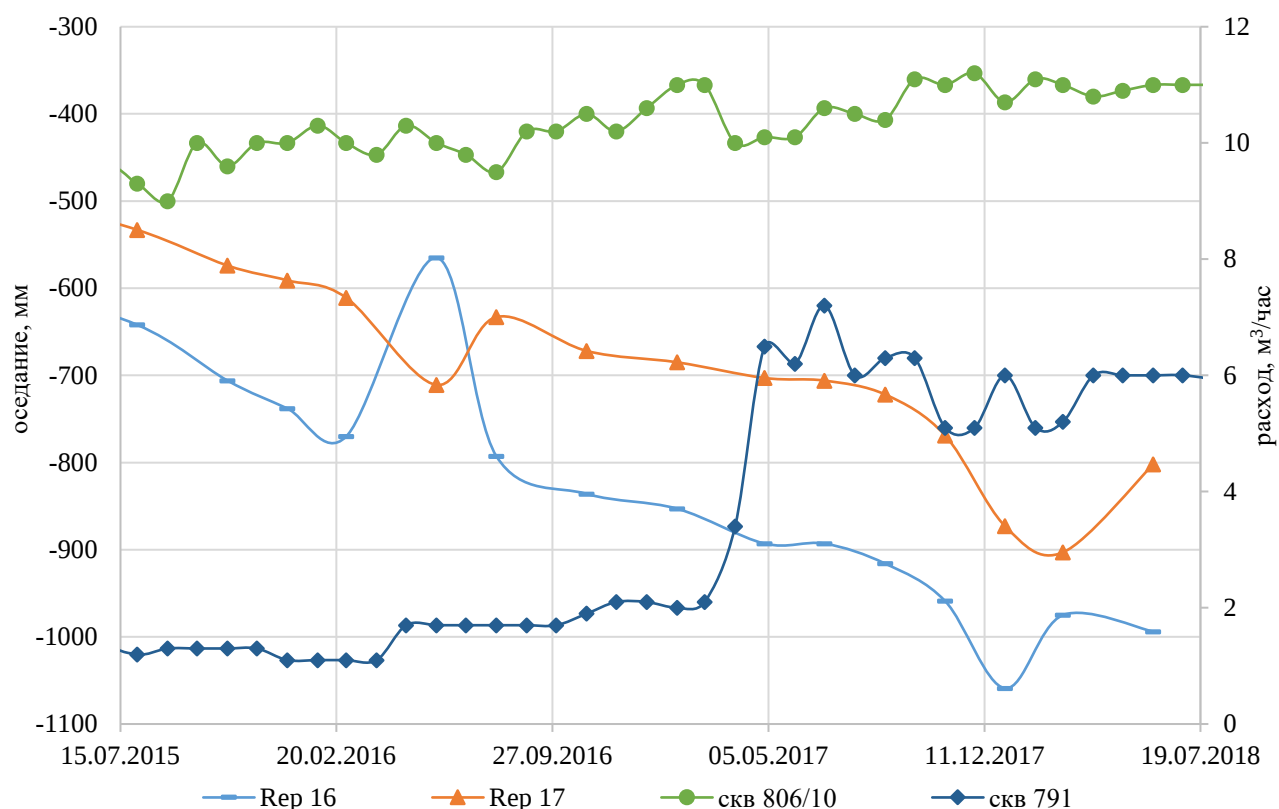


Рисунок 3.3 – График сопоставления смещений реперов и изменения дебита дренажных скважин, блок 6-7

Из гидрогеологических предпосылок увеличения проницаемости горных пород подрабатываемого водозащитного целика стоит выделить рост доли перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта. Данный тезис подтверждается постепенным изменением химического состава дренажных вод в рудничном водосборнике. Так, с 2014 по 2022 гг. минерализация вод в главном водосборнике рудника уменьшилась с 2295 мг/дм³ до 1500 мг/дм³, как и содержание характерного для руднокристаллического водоносного горизонта хлорид иона с 1047 мг/дм³ до 840 мг/дм³ (таблица 3.1).

Таблица 3.1 –Изменение значений концентраций анионов в рудничных водах

Показатель	2014 г.	2022 г.
SO ₄ , мг/дм ³	95	62
Cl, мг/дм ³	1047	840
F, мг/дм ³	8,53	2.8
рН	7,8	8,2
сух. ост, мг/дм ³	2295	1500
общий водоприток, м ³ /час	455	685

Как отмечалось в разделе 2.1.3, средняя минерализация вод НВГ составляет 0,5 г/дм³, в то время как РВГ 3,2 г/дм³. Воды РВГ горизонта характеризуются хлоридным натриевым составом, а НВГ гидрокарбонатным натриевым составом. Данные по химическому составу рудничных вод, приведённые в таблице 3.1, а также стационарному притоку к капитальным

выработкам на фоне роста водопритока к наиболее техногенно нарушенному очистному пространству (рис. 2.15), в очередной раз свидетельствуют об увеличении фильтрационных параметров водозащитной толщи.

Более того, собранные автором материалы о водопрооявлениях в горных выработках и минерализации этих вод указывают на наличие обширного количества зон с прямой гидравлической связью между НВГ и РВГ. На схеме точек опробования всех водопрооявлений на горизонте -375 м вынесены значения минерализации вод (рис 3.4).

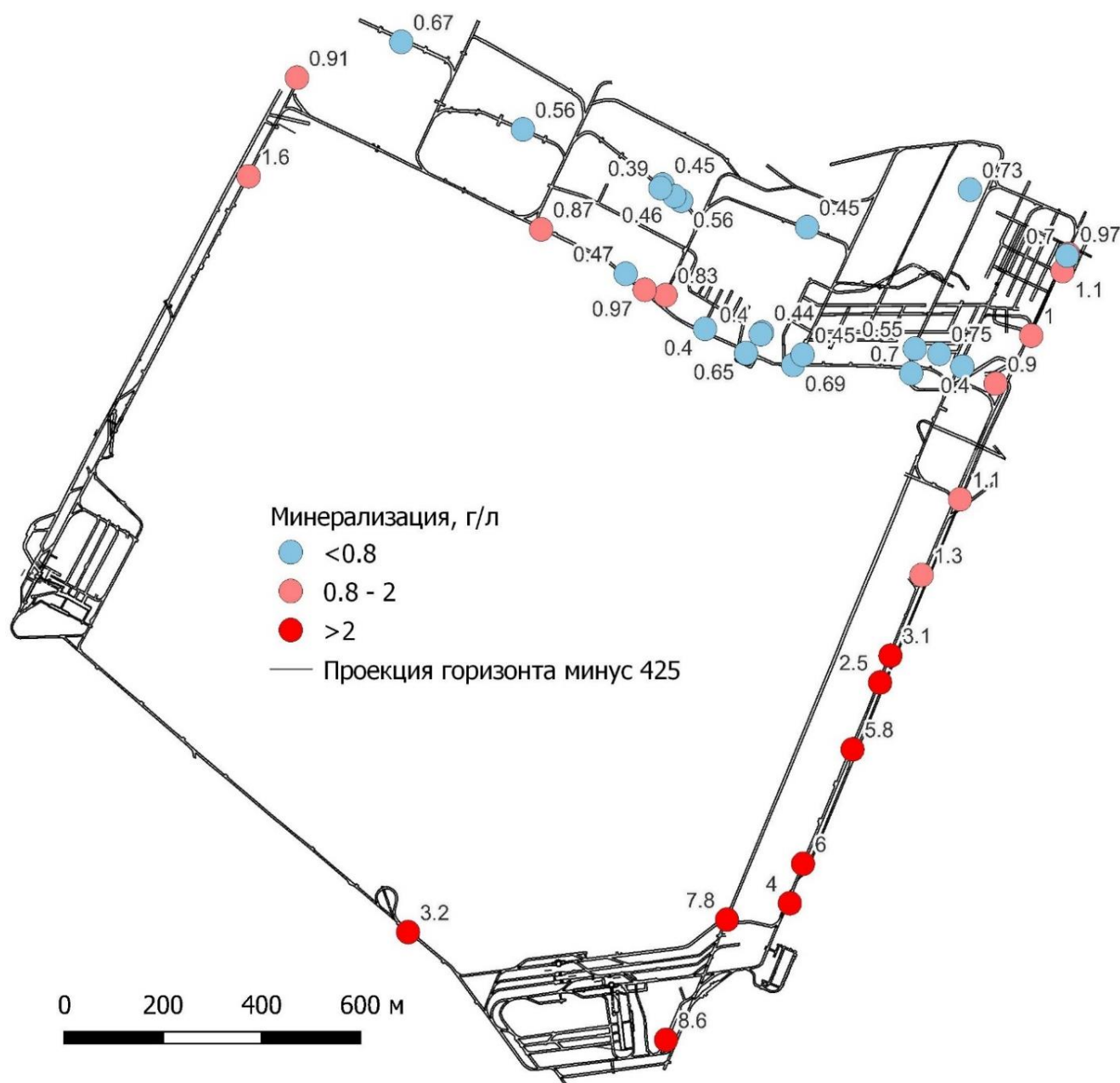


Рисунок 3.4 – Схема точек опробования минерализации на участках водопрооявлений в руднике (по результатам гидрогеологической съемки автором)

Если говорить о водопритоке к зоне ведения очистных работ, то наблюдается прямо-пропорциональная связь между его ростом и ростом понижения в НВГ и РВГ, что также указывает на увеличение проницаемости подрабатываемого массива во времени (рис. 3.5).

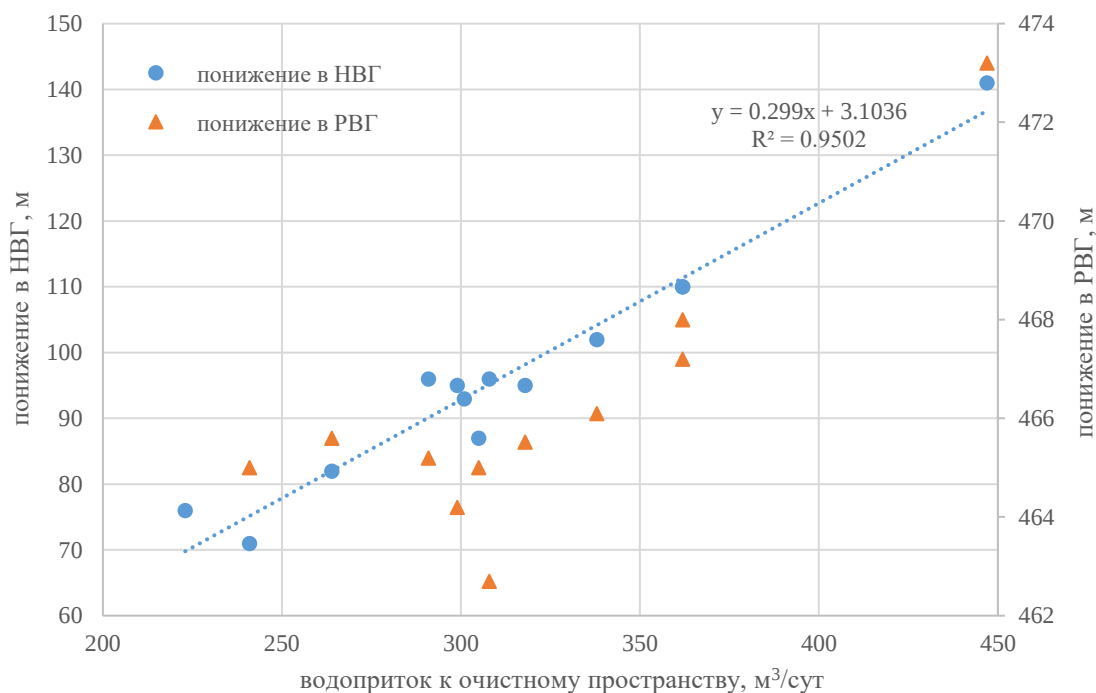


Рисунок 3.5 – График сопоставления водопритока к зоне ведения очистных работ и понижений в наблюдательных скважинах в НВГ и РВГ

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что искусственный фактор формирования водопритока к очистным выработкам в лице техногенного увеличения проницаемости является недооцененным и при этом одним из ключевых для Яковлевского рудника, что подтверждается приведённым анализом предпосылок, основанных на хронологическом изменении геомеханических и гидрогеологических параметров ведения горных работ.

3.2 Оценка балансовых составляющих формирования водопритока с помощью объемно-весового метода

Уточнение схемы формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника в рамках диссертационной работы производится не только качественно, исходя из предпосылок увеличения или уменьшения каждой их составляющих, основанных на изменении гидрогеологических и геомеханических параметров ведения горных работ, но и количественно.

При количественной оценке составляющих в общем балансе формирования водопритока и уточнении его схемы был использован объёмно-весовой метод, исходными материалами для которого послужили собранные автором в рамках гидрогеологической съемки выработок данные, а также накопленные ранее материалы геологоразведочных работ и мониторинговой службы рудника.

Для поиска объема подземных вод, который поступает к горным выработкам из НВГ и РВГ в отдельности, необходимо знание о средней минерализации и компонентом составе вод

каждого из горизонтов, а также химический состав и объем итоговой смеси (дренажных вод на ключевых участках).

Как отмечалось ранее, средний приток подземных вод, поступающий от капитальных выработок за 2022 г. составляет $156 \text{ м}^3/\text{час}$, при этом к очистным выработкам, дренируемым через порожняковый квершлаг, поступает $447 \text{ м}^3/\text{час}$. Согласно ежегодным отчетам мониторинговой службы рудника, результатам геологоразведочных работ за более чем полувековую историю разведки месторождения, собранных автором данным и принятым в техническом проекте разработки месторождения значениям средняя минерализация вод НВГ составляет $0,5 \text{ г/дм}^3$.

Следует отметить, что ввиду сильной изменчивости состава пород фундамента, наличием несистемных зон трещиноватости с рассредоточенным высачиванием вод в их пределах, минерализация РВГ колеблется от 2 до 13 г/дм^3 . Однако, согласно многолетним наблюдениям мониторинговой службы и замерам минерализации автором, среднее значение в дренажных и наблюдательных скважинах на РВГ, а также водопрооявлениях лежащего бока, где не ведутся горные работы и не происходит нарушение массива его подработкой, составляет $3,2 \text{ г/дм}^3$.

Согласно накопленным данным о компонентном составе подземных вод РВГ, НВГ и дренажных вод, хлорид ион также может быть использованным для количественной оценки, так-как по нему в отдельные периоды выполнялись анализы дренажных вод рудника. Среднее содержание хлорид иона в РВГ и НВГ составляет 1800 мг/дм^3 и 148 мг/дм^3 соответственно, в дренажных водах 850 мг/дм^3 (2022 г.). Ввиду отсутствия замеров концентрации других компонентов в дренажных водах оценка будет осуществлена по предложенным показателям: минерализации и хлорид иону.

Ввиду ранее озвученных особенностей динамики изменения водопритока к капитальным и очистным горным выработкам весь рудник был разделён на 2 принципиально разные зоны. К первой зоне относятся стволы, их руддворы, а также все транспортные, грузовые и вентиляционные выработки, ведущие к очистному пространству. Объем дренажных вод и их химический состав в пределах выработок этой зоны постоянен на протяжении многих лет и не определяет динамику изменения химического состава и величины суммарного водопритока в рудник. Ко второй зоне относятся все выработки в зоне активного ведения горных работ, расположенные непосредственно в пределах рудной полосы (рис. 3.6).

Задача оценки балансовых составляющих формирования водопритока к очистным выработкам решалась поступательно согласно объемно-весовому методу [102]. Первоначально, исходя из известных концентраций показателей вод I зоны и дренажных вод в главном водосборнике, а также объемов в обеих зонах и водосборнике, вычислялась концентрация компонента во II зоне.

Далее производился расчет объемов, поступающих из каждого водоносного горизонта к очистному пространству по такому же методу: исходя из известных значений концентрации компонента в водоносных горизонтах (смешиваемых растворах), а также объема вод и концентрации компонента при выходе из II зоны (в получаемом растворе) производится расчет исходных поступающих за один час объемов из каждого горизонта. Для этого составлялось уравнение с одной неизвестной (раздел 2.2.2).

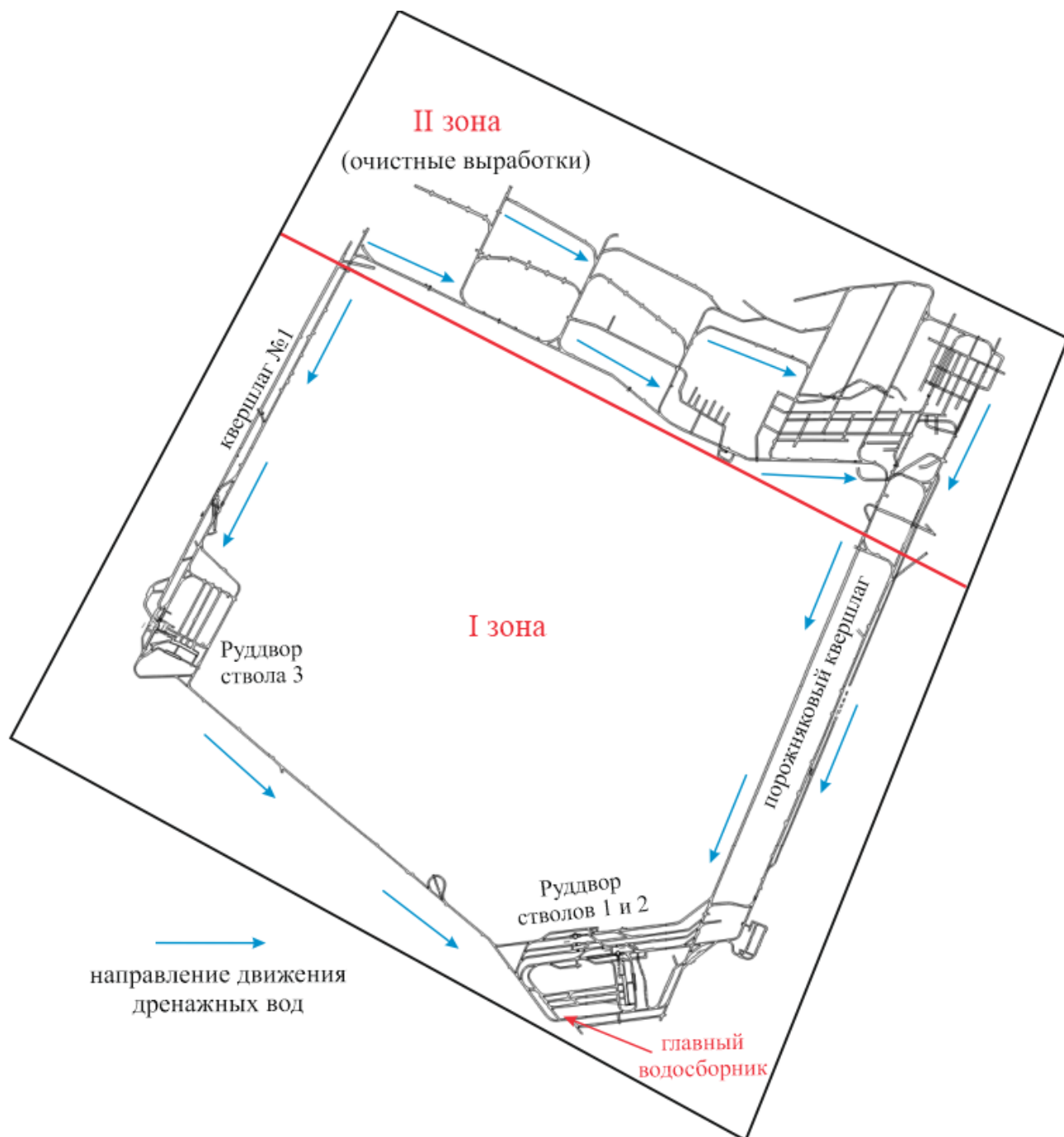


Рисунок 3.6 – Схема деления на балансовые зоны с указанием направления движения дренажных вод

Например, для поиска минерализации дренажных водах при выходе из II зоны (всей зоны очистных выработок) на июль 2022 г. получим следующее уравнение (3.1).

$$V_I M_I + V_{II} M_{II} = V_p M_p \quad (3.1)$$

где: V_I, V_{II}, V_p – объем дренажных вод в выбранную единицу времени, поступающий с I, II зон и суммарный водоприток в рудник, которые соответственно равны 160, 525 и 685 м³/ч; M_I, M_{II}, M_p – минерализация дренажных вод каждой в каждой из зон и в главном водосборнике, которые составляют 3 г/л в I зоне и 1,63 в главном водосборнике (2022 г.).

Таким образом, искомая величина минерализации дренажных вод II зоны составит (объемы взяты в час):

$$M_{II} = \frac{V_p M_p - V_I M_I}{V_{II}} = \frac{603 \cdot 1,5 - 156 \cdot 3,2}{447} = 0,91 \text{ г/дм}^3$$

Найденное значение минерализации близко к эмпирическому, полученному автором в ходе гидрогеологической съемки рудника. Величина минерализации дренажных вод в водоотводящей канавке по трем замерам кондуктометром составила 0,87-0,91 г/дм³, что подтверждает правильность расчета и выбора метода. Верификация метода проводилась только по данным за 2022 г. ввиду отсутствия подобных замеров в предыдущие периоды.

Следующим этапом является поиск объемных составляющих (доли НВГ и РВГ) в общем балансе формирования водопритока к очистным выработкам. В связи с этим уравнение имеет следующий вид (3.2).

$$V_{\text{НВГ}} M_{\text{НВГ}} + V_{\text{РВГ}} M_{\text{РВГ}} = V_{II} M_{II} \quad (3.2)$$

где: $V_{\text{НВГ}}$ и $V_{\text{РВГ}}$ – искомые объемы, поступающие к очистному пространству из нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов; $M_{\text{НВГ}}$ и $M_{\text{РВГ}}$ – минерализация подземных вод в НВГ и РВГ.

Наличие двух неизвестных в уравнении 3.2 можно свести к одной, представив вторую из них как разницу между общим объемом и первой (x), тогда получится 3.3.

$$x \cdot M_{\text{НВГ}} + (V_{II} - x) M_{\text{РВГ}} = V_{II} M_{II} \quad (3.3)$$

Подставляя в уравнение 3.3 известные величины и перенося искомую неизвестную получим:

$$1430,4 - 406,77 = 3,2x - 0,5x$$

Таким образом, на долю НВГ и РВГ в общем балансе водопритока к очистным выработкам на 2022 г. приходится 380 м³/ч и 67 м³/ч из 447 м³/ч поступающих к ним, что означает 85 % и 15 % соответственно.

Проводя аналогичный расчет по концентрации хлорид иона получим схожий результат: НВГ и РВГ формируют 391 м³/ч и 56 м³/ч соответственно, что составляет 88 % и 12 % от общего водопритока к очистным выработкам.

Исходные и расчетные параметры для других периодов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные и расчетные величины при балансовой оценке (за 1 час)

Год	$V_{\text{общ}}, \text{м}^3$	$V_I, \text{м}^3$	$V_{II}, \text{м}^3$	$M_p, \text{г/дм}^3$	$Cl_p, \text{г/дм}^3$	$M_{II}, \text{г/дм}^3$	$Cl_{II}, \text{г/дм}^3$
						расчетные величины по уравнению 3.1	
2022	603	156	447	1,5	0,84	0,91	0,5
2018	505	143	362	2,06	0,992	1,61	0,67
2017	505	143	362	2,22	1,107	1,83	0,83
2016	481	143	338	2,155	1,093	1,71	0,79
2015	461	143	318	2,134	1,241	1,65	0,99
2014	443	138	305	2,293	1,05	1,88	0,71
2013	385	144	241	1,61	0,89	0,66	0,35
2012	404	140	264	1,611	0,9	0,77	0,42
2011	436	145	291	1,94	0,91	1,31	0,47
2010	439	140	299	2,56	1,43	2,26	1,26
2009	452	144	308	2,708	1,444	2,48	1,28
2008	459	158	301	2,622	1,393	2,32	1,19
2005	427	204	223	2,9	1,67	2,63	1,55

Используя полученные расчетные параметры, для каждого из доступных периодов можно рассчитать доли нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов от общего водопритока к II балансовой зоне. Результаты количественной оценки составляющих в общем балансе водопритока к очистным выработкам, выраженные в $\text{м}^3/\text{ч}$ и процентном отношении, за 2005, 2008-2018 и 2022 гг. приведены в таблице 3.3.

Таблице 3.3 – Результаты расчета балансовых составляющих водопритока из нижнекаменноугольного (НВГ) и руднокристаллического (РВГ) горизонтов

год	НВГ, $\text{м}^3/\text{ч}$	РВГ, $\text{м}^3/\text{ч}$	НВГ, %	РВГ, %	НВГ, $\text{м}^3/\text{ч}$	РВГ, $\text{м}^3/\text{ч}$	НВГ, %	РВГ, %
	по общей минерализации				по хлорид иону			
2005	47	176	21	79	38	185	17	83
2008	98	203	33	67	124	177	41	59
2009	82	226	27	73	109	199	35	65
2010	104	195	35	65	110	189	37	63
2011	203	88	70	30	262	29	90	10
2012	238	26	90	10	246	18	93	7
2013	227	14	94	6	237	4	98	2
2014	149	156	49	51	224	81	74	26
2015	182	136	57	43	174	144	55	45
2016	186	152	55	45	230	108	68	32
2017	183	179	51	49	236	126	65	35
2018	213	149	59	41	276	86	76	24
2022	380	67	85	15	391	56	88	12

Из таблицы 3.3 можно заметить, что доля НВГ в общем балансе водопритока к очистному пространству претерпевает значительный рост в период с 2005 по 2022 гг. и начинает играть ведущую роль. Вместе с тем, приведённые в разделе 3.1 предпосылки увеличения проницаемости горных пород надрудной зоны также подтверждаются количественной оценкой составляющих водопритока. Данные обстоятельства обуславливают важность роли техногенного фактора увеличения проницаемости пород перекрывающего водозащитного целика и требуют создания новой изменяющейся во времени схемы формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника.

Следует подчеркнуть, что значения долей составляющих водопритока, полученные в период с 2011 г. по 2013 г. имеют меньшую достоверность ввиду проведения в данный временной интервал технических работ с дренажными скважинами: отключения, промывки и выведения части из эксплуатации, что также отражается на графиках изменения уровней подземных вод в НВГ и вышележащих водоносных горизонтах (раздел 2.1.4).

Построенные по результатам расчетов графики хронологического изменения часового водопритока из нижнекаменноугольного водоносного горизонта, полученные по минерализации и хлорид иону, демонстрируют наличие экспоненциальной зависимости его роста во времени, в то время как аналогичные графики для руднокристаллического водоносного горизонта – отрицательную линейную с уменьшением величины водопритока (рис. 3.7 и 3.8).

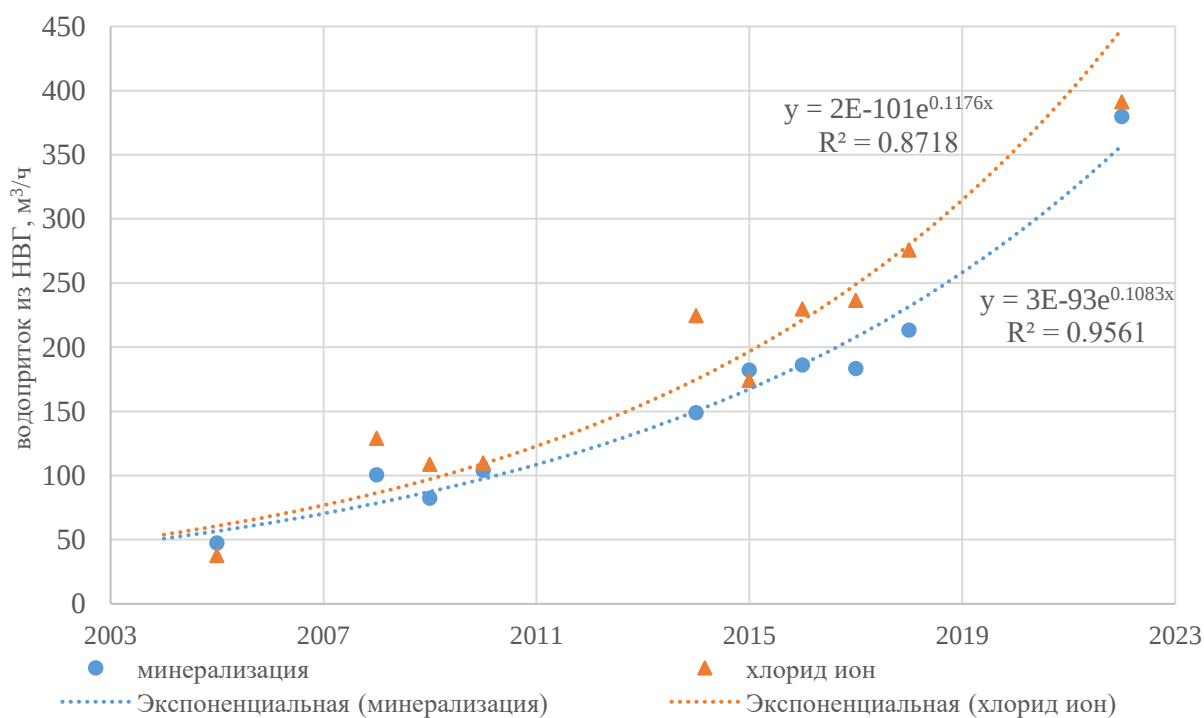


Рисунок 3.7 – Хронологический график изменения водопритока из НВГ к очистным выработкам

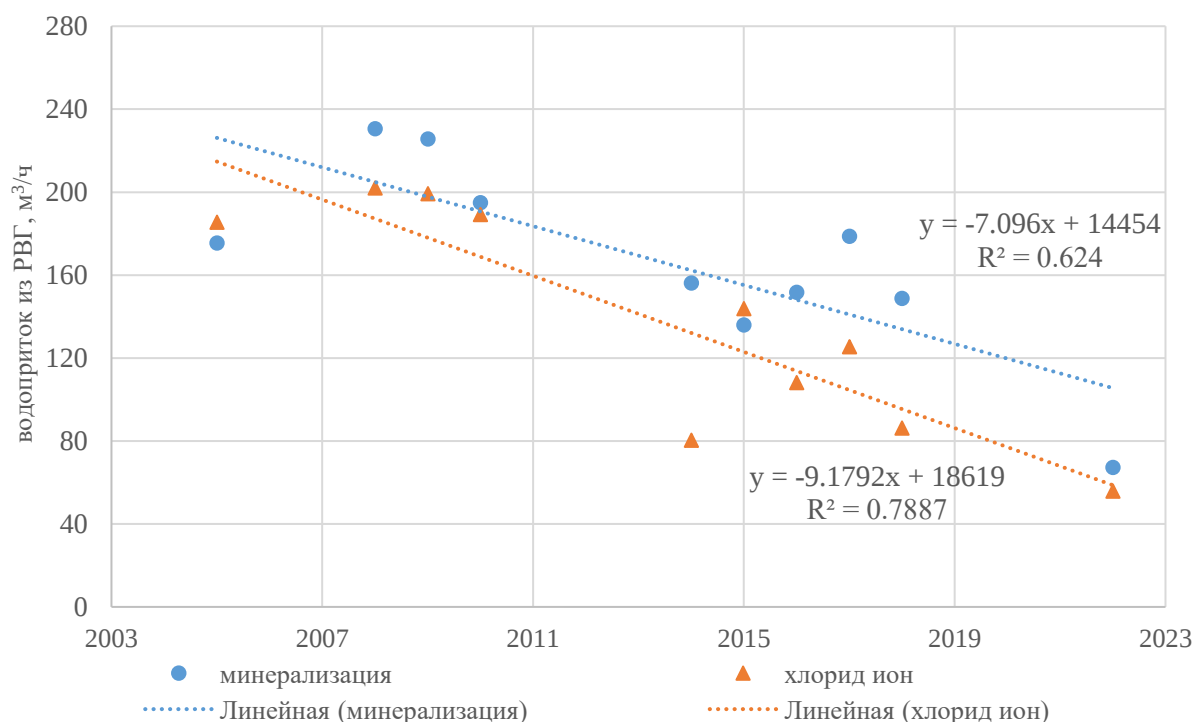


Рисунок 3.8 – Хронологический график изменения водопритока из РВГ к очистным выработкам

Полученные зависимости напрямую связаны с режимом фильтрации в каждом из водоносных горизонтов: для РВГ характерен близкий к стационарному режим фильтрации на конечном этапе его дренирования (при сохранении конфигурации горных выработок), а водоприток из НВГ испытывает постоянный рост ввиду нисходящего перетекания через породы водозащитной толщи, проницаемость которых из-за техногенного фактора увеличивается со временем, при этом сам НВГ является недренированным.

Не смотря на изменчивость величины суммарного водопритока ко II балансовой зоне процентные доли водопритока к очистным выработкам каждой из составляющих демонстрируют аналогичные абсолютным значениям зависимости (рис. 3.9 и 3.10). В данном случае в роли корреляционной пары выступают процент каждого из водоносных горизонтов от суммарного водопритока ко II зоне и год.

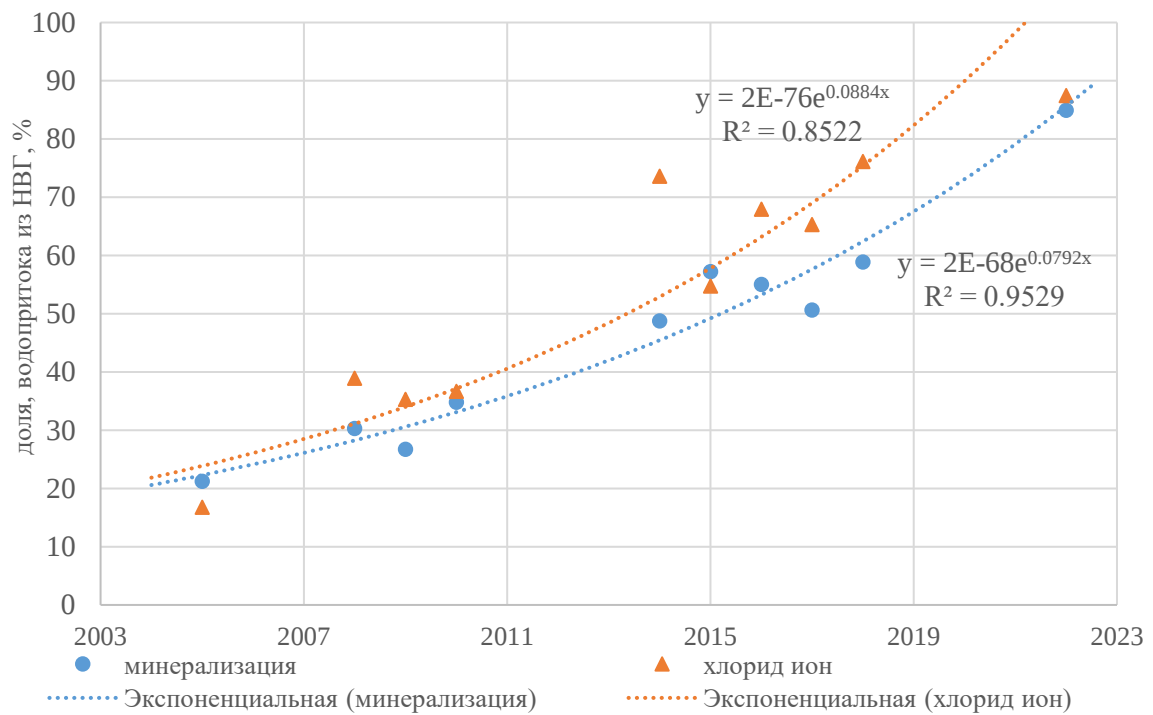


Рисунок 3.9 – Хронологический график изменения доли водопритока из НВГ к очистным выработкам

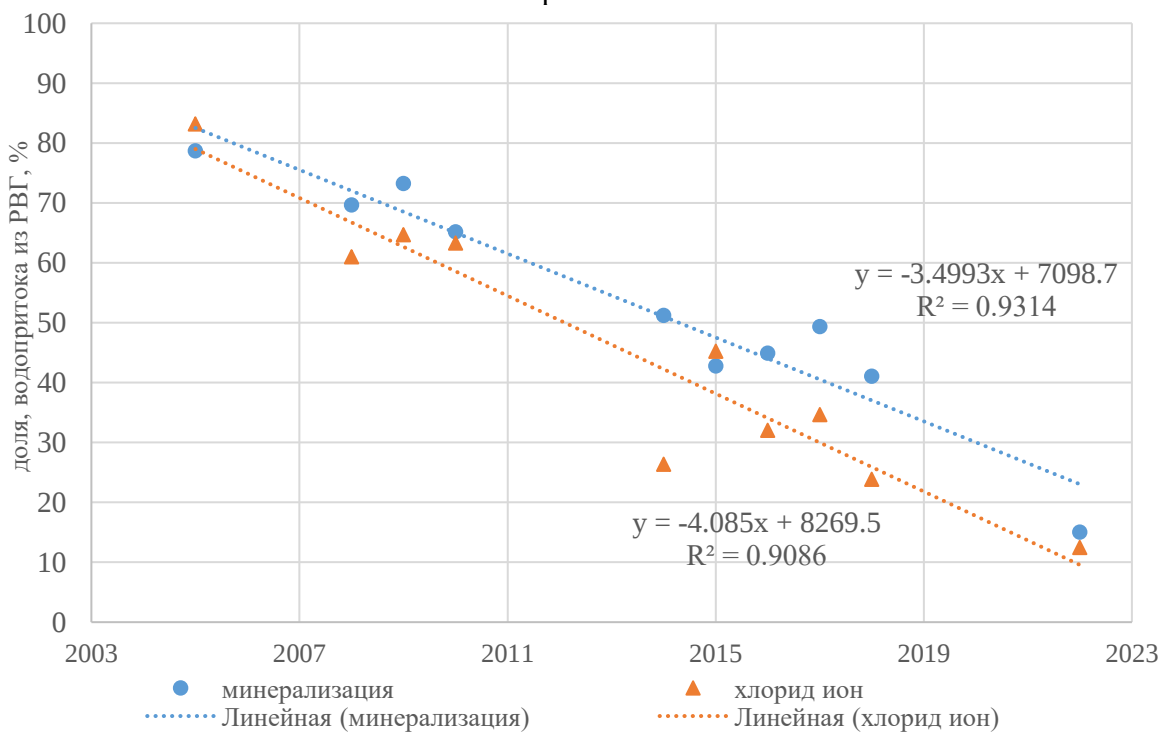


Рисунок 3.10 – Хронологический график изменения доли водопритока из РВГ к очистным выработкам

3.3 Оценка балансовых составляющих формирования водопритока с помощью метода численного геофильтрационного моделирования

Для прогнозирования техногенного гидродинамического режима подземных вод в районе Яковлевского месторождения автором была создана численная геофильтрационная

модель в программном пакете «НИМФА» (разработчик Российский Федеральный ядерный центр-ВНИИЭФ).

Как отмечалось в разделе 2.2.2 при использовании метода численного геофильтрационного моделирования принято выделять несколько этапов [88]:

1. Информационное обеспечение численной модели;
2. Схематизация гидрогеологических условий исследуемой территории;
3. Построение модели и выбор вычислительного алгоритма решения, включая критерии сходимости получаемых результатов;
4. Калибровка модели – решение обратных задач на основе имеющихся сведений о расходах и/или распределении фактических напоров, верификация и генерализация фильтрационных параметров;
5. Анализ результатов калибровки модели, корректировка модели;
6. Решение прогнозных задач.

На некоторых из приведённых этапов целесообразно остановиться подробнее. Сведения о третьем этапе приведены в разделе 2.2.2.

3.3.1 Параметрическое обеспечение модели

На данном этапе производился сбор сведений о геолого-гидрогеологическом строении территории исследований и рельефе, геометрии гидрогеологических стратонов, опытно-фильтрационных и гидрометеорологических исследованиях, мониторинге за гидродинамическим естественным и техногенным режимами подземных вод, погоризонтных конфигурациях выработок Яковлевского рудника.

В основу параметрической базы модели были положены результаты геологоразведочных работ Белгородской экспедиции на Яковлевском месторождении Белгородского железорудного района 1956-1962 гг., геологической и гидрогеологической доразведки Яковлевского месторождения в период с 1982 по 1986 гг., комплексных гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях 1956-1958 гг., под руководством А.А. Саара, геологоразведочных работ в районе Белгородского железорудного узла под руководством Леоненко И.Н. и Чайкина С.И. в 1960-х гг., опытно-производственных понижений с 1988 по 1991 гг., гидрометеорологических изысканий 2010 года для II очереди строительства Яковлевского рудника, многолетнего мониторинга уровней подземных вод и притоков к горным выработкам.

Построение каркасов гидрогеологических тел осуществлялось в программном пакете «Leapfrog Geo» по 36 опорным скважинам, в плане охватывающим всю исследуемую территорию (рис. 3.11). 17 из 36 скважин расположены в непосредственной близости от

шахтного поля. Выбранные скважины вскрывают все литологические разности: их забои находятся в породах фундамента на глубинах более 550 м.

Ввиду слабой изученности отдаленных от месторождения участков густота скважин увеличивается от границ исследуемого района к руднику. Данное обстоятельство существенно не влияет на параметры модели ввиду общего моноклиналичного залегания выдержанных пластов в юго-западном направлении и отсутствием выклинивающихся разностей (рис. 3.12).

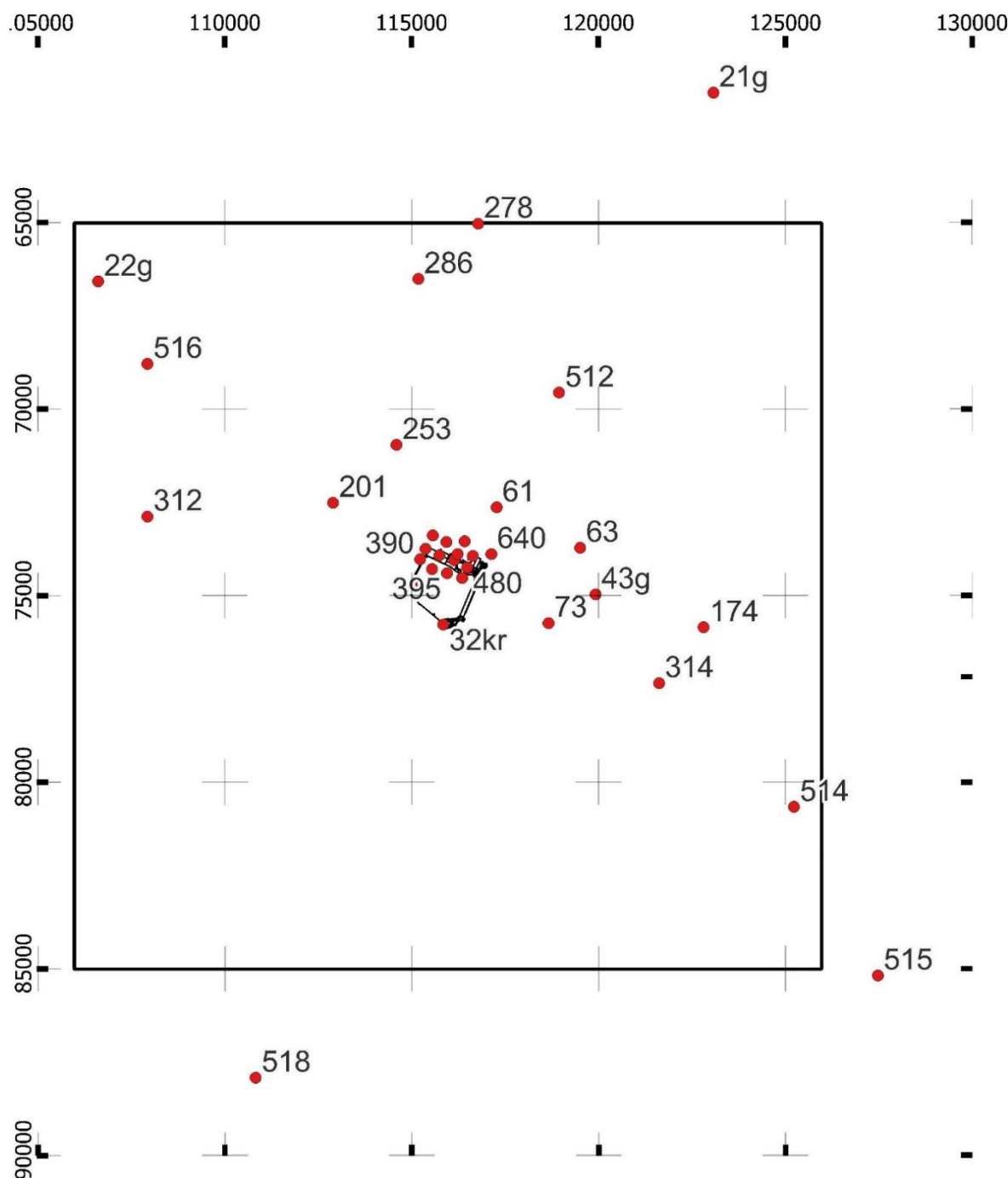


Рисунок 3.11 – Схема расположения опорных скважин для построения геологической модели

Кровлей первого от поверхности горизонта является дневная поверхность местности. Данные о геоморфологическом строении рассматриваемой территории были получены с

аэрофотоснимков Геологической службы США (USGS). Точки с известными координатами располагаются на расстоянии 150 м друг от друга.

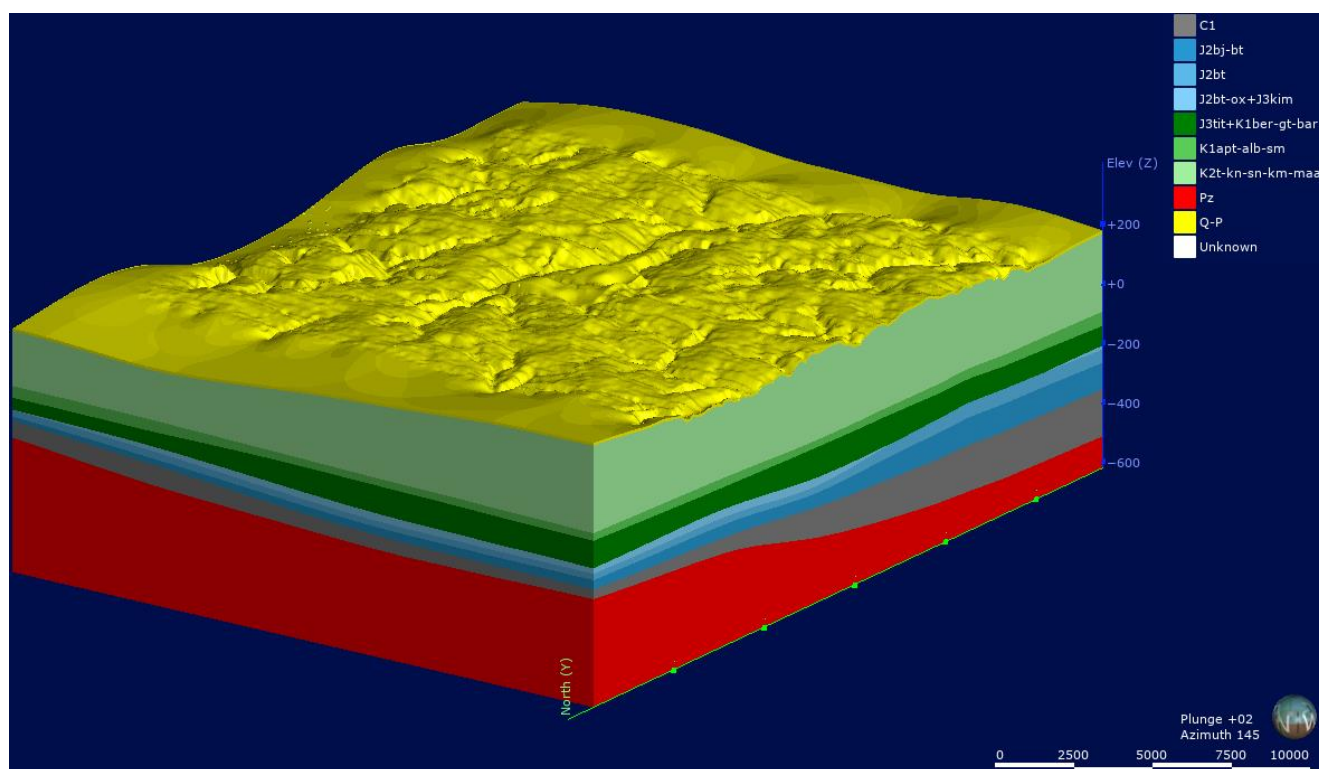


Рисунок 3.12 – Гидрогеологические тела для геофильтрационной модели (вид на моделируемый участок с северо-западного направления)

Средняя величина инфильтрации а также проводимость подрусловых отложений долины реки Ворскла и её притоков были обоснованы в отчёте о результатах гидрометеорологических изысканий 2010 года для II очереди строительства Яковлевского рудника. Согласно отчету, расчетная инфильтрация принята равной 0,00022 м/сут (80 мм/год), а коэффициент фильтрации подрусловых отложений линейных речных объектов 0,5 м/сут [85].

Фильтрационные и емкостные параметры моделируемых водоносных горизонтов и комплексов были взяты по результатам опытно-фильтрационных исследований. С 1955 по 1962 гг. было проведено: 71 одиночная, 8 кустовых и 2 групповых откачки. Говоря о нижнем водоносном комплексе, в плане скважины располагались как в лежащем и висячем боках, так и над рудной полосой (рис. 2.8). На этапе доразведки Яковлевского месторождения в 1986 г. был пробурен профиль из 9 гидрогеологических скважин в плане непосредственно на площади ведения очистных работ. Фильтрационные опробования включали в себя одиночные откачки из каждой скважины при двух-трех ступенях дебитов как для руднокристаллического, так и нижнекаменноугольного горизонтов.

В период опытно-производственного водопонижения комбинированным способом в 1988-1991 гг. (с поверхности скважинами и узлами дренажных скважин из горных выработок) были достигнуты понижения уровней в НВГ и РВГ 235 м и 170 м соответственно. Проведённое

в течение 10 дней восстановление уровней и последующая интерпретация на 3-х слойной модели позволили получить значение вертикального коэффициента фильтрации глин и переотложенных бокситовых руд в прикровельной части водозащитной толщи в размере $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут (рис. 3.13). Именно данные отложения несут на себе основную «водозащитную» функцию, поскольку коэффициент фильтрации богатых железных руд на порядки выше и находится в диапазоне от сотых до десятых долей м/сут. В связи с такой природной неоднородностью в разрезе, величина перетекания на модели не чувствительна к

Более подробные сведения о ранее проведённых опытно-фильтрационных исследованиях для каждого водоносного подразделения приведены в разделе 2.1.3. В нём также перечислены основные зоны неоднородности фильтрационных параметров водоносных горизонтов и комплексов как в разрезе, так и в плане.

Таким образом, для информационного обеспечения при создании и калибровки геофильтрационной модели использовались параметры, приведённые в таблице 3.4 [82, 84-86]. Турон-маастрихтский и нижнекаменноугольный водоносные горизонты в таблице разделены на подслои с номерами «1 и 2», что соответствует их естественным фильтрационным неоднородностям в разрезе. Емкостные параметры, выделенные в таблице курсивом, взяты из справочника гидрогеолога под редакцией В.М. Максимова (1979) в соответствии с литологией стратонов.

Таблица 3.4 – Параметрическая база фильтрационных параметров водоносных горизонтов и комплексов., курсивом – взятые по справочнику Максимова В.М (1939 г.)

Горизонт/ комплекс	Кф, м/сут	Т, м ² /сут	а*, м ² /сут	μ
Четвертично-палеогеновый	0,02-16	30-0,05	<i>1000</i>	<i>0,0005</i>
Турон-маастрихтский 1	1-7	до 2060	<i>1*10⁶</i>	<i>0,0005</i>
Турон-маастрихтский 2	0,0003-0,0015	0,02-0,2	<i>1*10⁴</i>	<i>0,000013</i>
Апт-сеноманский	0,03-1,2	1-100	<i>1*10⁴</i>	<i>0,006</i>
Титон-барремский	0,01-0,4	0,1-52	<i>8000</i>	<i>0,006</i>
Келловей-киммериджский	0,001	до 0,07	<i>1000</i>	<i>0,0001</i>
Батский	0,2-2,3	1-39	<i>5*10⁵</i>	<i>0,00005</i>
Байос-батский	0,00005	до 0,002	<i>0,03</i>	<i>0,065</i>
Нижнекаменноугольный 1	2-7,12	80-430	<i>1*10⁶</i>	<i>0,00008</i>
Нижнекаменноугольный 2	<i>1*10⁻⁶</i>	до <i>5*10⁻⁶</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>
Руднокристаллический (граниты и кварциты)	0,00001-0,005	0,01-11	<i>(1,6-20)*10⁴</i>	<i>0,00001</i>
Руднокристаллический (богатые железные руды)	0,02-0,15	2-32	<i>1.12*10⁴</i>	<i>0,001</i>
Руднокристаллический (филлитовые сланцы)	0,02-0,32	5-48	<i>(1,6-22)*10⁴</i>	<i>0,0001</i>

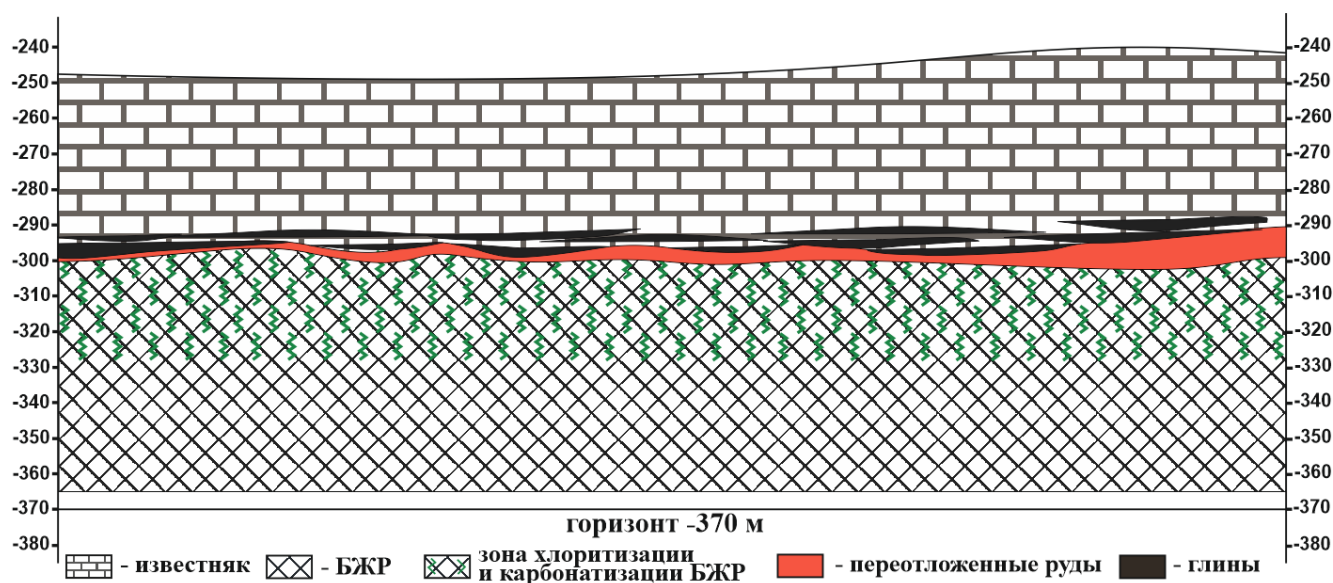


Рисунок 3.13 – Схема профильного строения водозащитной толщи на основе материалов разведки и доразведки Яковлевского месторождения (1958-1961 гг и 1987 г)

3.3.2 Схематизация гидрогеологических условий исследуемого участка

Проведённый ранее анализ гидрогеологических естественных и техногенно изменённых условий Яковлевского месторождения указывает на необходимость учёта при численном геофильтрационном моделировании следующих особенностей исследуемой территории:

1. Наличие в разрезе двух гидрогеологических комплексов, разделённых региональным водоупором байосс-батского возраста;
2. Вертикальную анизотропию фильтрационных свойств пород турон-маастрихтского терригенно-карбонатного комплекса (K_2t-m) и каменноугольного терригенно-карбонатного горизонта (C_1);
3. Наличие развитой гидросети, состоящей из мелких рек, дренирующих первый от поверхности водоносный горизонт;
4. Плановую неоднородность фильтрационных свойств в руднокристаллическом водоносном комплексе и нижнекаменноугольном горизонте, связанную с наличием рудной полосы и нескольких петротипов кристаллических пород фундамента в лежащем и висячем боках месторождения;
5. Развитую систему горных выработок, выполняющих роль дрен в руднокристаллическом водоносном комплексе;
6. Зону сдвижения с повышенными относительно естественных фильтрационными параметрами в кровле выработок -370 гор.;
7. Наличие инфильтрационного питания первого от поверхности водоносного горизонта.

Гидродинамические границы модели задавались с учетом планового естественного фильтрационного потока, величины зоны влияния на подземные воды дренажного эффекта Яковлевского рудника и фильтрационных неоднородностей горных пород.

Северная граница моделируемой области совпадает с положением линии равных напоров (150 м) фильтрационного потока подземных вод нижнего комплекса и задаётся I родом с помощью функции «Боковое ГУ». Аналогично задаются уровни на северной границе I рода для водоносных горизонтов верхнего комплекса. Ввиду субмеридионального направления движения подземных вод и расположения гидроизогипс в субширотном направлении южная граница также задавалась I родом.

Западная и восточная границы верхнего комплекса, водоносные горизонты которого расположены в зоне активного водообмена и питаются за счет атмосферных осадков, совпадают с положением линий тока и задаются границей II рода. В отличие от верхнего комплекса, на водоносные горизонты нижнего оказывает существенное влияние дренажный эффект рудника, а доля питания транзитными водами на рассматриваемом участке выше доли перетекания через региональный водоупор. В связи с этим, для НВГ и РВГ западная и восточная границы области моделирования были заданы с помощью инструмента «Сегмент реки», представляющий собой границу III рода с переменным уровнем. При этом значение коэффициента фильтрации данных границ задавалось таким образом, чтобы напоры на контуре модели соответствовали напорам на удалении 5 км от границ модели. Для этого использовалась следующая формула 3.4:

$$k = (k_{\text{сл}} \cdot m_{\text{сл}}) / D \quad (3.4)$$

где: k – коэффициент фильтрации на границе III рода; $k_{\text{сл}}$ – коэффициент фильтрации слоя; $m_{\text{сл}}$ – мощность слоя; D – расстояние от границы модели до задаваемой границы (5 км).

Вычислительная схематизация модели характеризуется разбиением на расчетные слои, соответствующие гидрогеологическим подразделением из таблицы 3.4. Следует также отметить, что руднокристаллический комплекс разбит на 15 расчетных слоев, из которых 11 имеют мощность 5 м и включают в себя заданные дрены – послойные конфигурации горных выработок на соответствующих горизонтах в пределах отрабатываемого этажа (-425 – (-370 м)). Ниже выработок расположены 2 расчетных слоя, моделирующих зону затухания трещиноватости до отметок -800 м. по аналогии с криворожскими железорудными месторождениями [82]. Над кровлей выработок оставлен расчетный слой с 6 расчетными подслоями, моделирующий водозащитную толщу. Такое дробное разбиение сделано для корректного отображения напоров в теле ВЗТ при их оценке (раздел 5.5).

Дробление на расчетные ячейки характеризуется наличием зоны и контура с заданным сеточным размером в плане. Зона дрен (горных выработок) разбита на ячейки с регулярным шагом 20 м. На контуре модели все ячейки имеют ребро 400 м. Остальное пространство в плане адаптивно разбито на расчетные ячейки с нерегулярным шагом, увеличивающимся от рудника к границе модели. Отношение размера ребер двух соседних ячеек не более 2.

Таким образом, в разрезе модели представлено 25 расчетных слоев, один из которых разбит на 6 подслоев. Суммарное количество расчетных ячеек в модели 705650.

3.3.3 Калибрация модели

Адекватность отображения моделируемой гидродинамической среды реальных условий месторождения оценивалась путем сопоставления модельных и натурных напоров в точках, соответствующих скважинам гидронаблюдательной сети месторождения (35 скважин), а также притоков к горным выработкам, оцениваемым по производительности рудничного водоотлива. Значения обоих параметров при калибровке модели использовались в соответствии с ранее проведенными опытно-фильтрационными исследованиями (таблица 3.4) и сведениями о гидрогеологическом мониторинге среды (осредненные годовые данные за 2005-2022 гг.).

В качестве конкретных периодов калибровки были выбраны те, что соответствуют проведенной ранее оценке балансовых составляющих водопритока в рудник объемно-весовым способом: 2005г., 2008-2011 гг., 2014-2018 гг. и 2022г.

В ходе калибровки модели было выявлено, что первые от поверхности водоносные горизонты верхнего комплекса ожидаемо имеют высокую чувствительность к величине инфильтрации атмосферных осадков, а также сопротивлению подрусловых отложений гидросети исследуемой территории, которая выступает в роли дренирующих линейных водотоков. Однако, с ростом глубины залегания это влияние резко снижается. Как отмечалось в разделе 2.1.3 вторая подзона (замедленного водообмена) верхнего комплекса в интервале между апт-сеноманским ($K_{1apt-sm}$) и батским (J_{2bt}) водоносными горизонтами залегает под мощными слабопроницаемыми отложениями турон-маастрихтского горизонта (K_{2t-maa}) и имеет устойчивый гидродинамический и гидрохимический режимы.

Верхний и нижний комплексы отделены региональным бат-байосским (J_{2bt-bj}) водоупором мощностью 40-80 м.

В отношении водопритоков к горным выработкам высокой чувствительностью обладают глины, переотложенные руды и бокситовые образования в кровле водозащитной толщи, задаваемые отдельным расчетным слоем на модели. Вертикальный коэффициент фильтрации данных отложений в существенной мере определяет объемы нисходящего перетекания

подземных вод НВГ. На этапе разведки месторождения, а также в рамках опытно-производственного водопонижения в период 1988-1992 гг. его значение составило $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут.

График сопоставления модельных и наблюдаемых величин водопритока в рудник представлен на рисунке 3.14. Максимальная ошибка общего притока подземных вод в рудник составила 8 %.

Результаты калибровки среднегодовых напоров на геофильтрационной модели по скважинам наблюдательной сети месторождения в период с 2005 по 2022 гг. приведены на отдельных графиках (Приложение 2). Обобщенный график сопоставления модельных и натурных напоров приведен на рисунке 3.15.

Функциональные возможности программного обеспечения «Нимфа» позволяют создавать зону со свойствами, в которой можно задавать тензор величин коэффициента фильтрации. Более того, значения данного параметра могут быть переменными во времени.

При калибровке модели, путем последовательного решения обратных задач в нестационарной постановке было выявлено, что с 2005г. по 2022г. техногенная нагрузка на целик при его подработке привела к разуплотнению дисперсных пород и увеличению значения вертикального коэффициента фильтрации до значения 0,0015 м/сут, что на три порядка больше естественного значения.

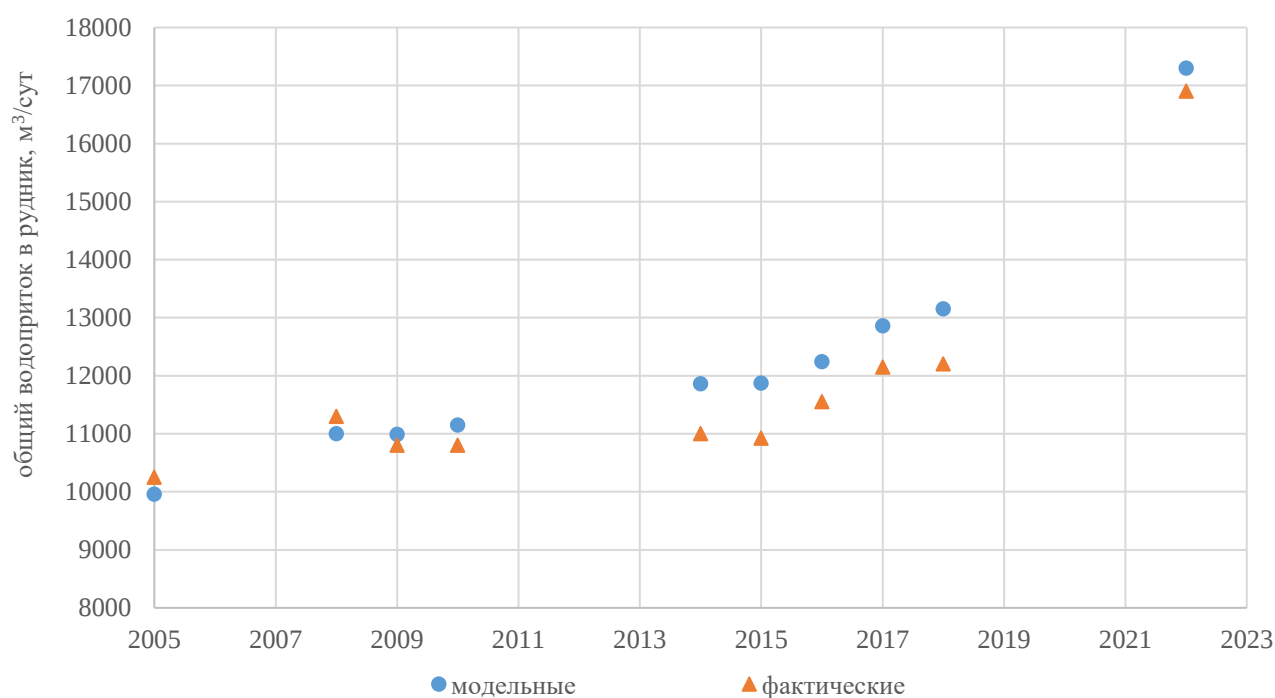


Рисунок 3.14 – График фактических и модельных (по результатам калибровки) водопритков в рудник в период с 2005 по 2022 гг. (При относительной ошибке баланса 0,92 %)

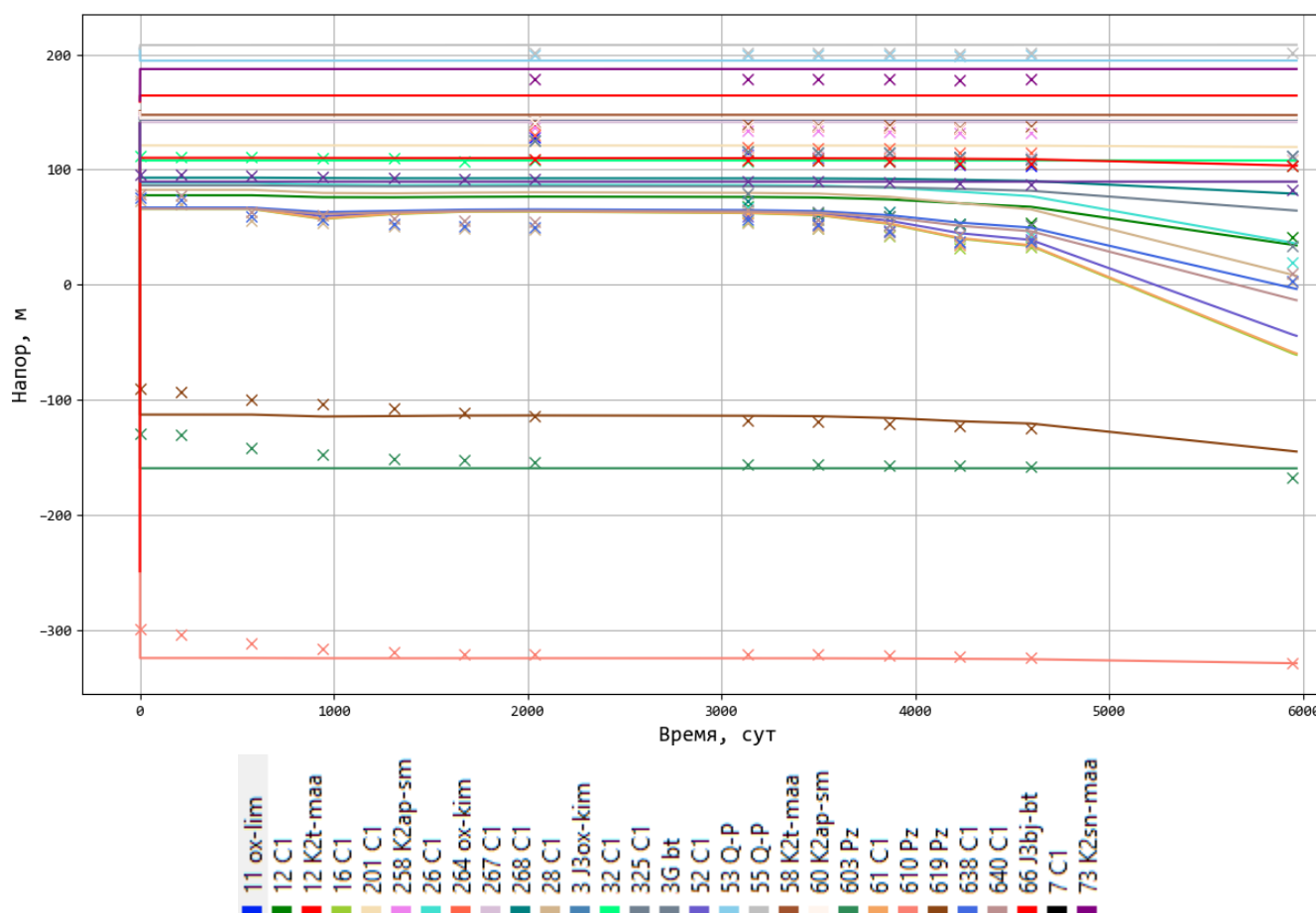


Рисунок 3.15 – График сопоставления модельных (линии) и натурных (крестики) значений напоров в скважинах мониторинговой сети (максимальное стандартное отклонение 15 м, относительная ошибка аппроксимации 3,3 %)

Карта гидроизопьез РВГ при техногенном гидродинамическом режиме на момент 2022 г. с обозначением положения рудника и сети наблюдательных скважин приведена на рисунке 3.16.

Таким образом, адекватность математической геофильтрационной модели реальной среде была достигнута путём калибровки по фильтрационным и емкостным параметрам (таблица 3.4), водопритокам подземных вод в рудник, обоснованным гидродинамическим границам, а также напорам во всех водоносных горизонтах в нестационарной постановке задачи с 2005 по 2022 г.

Как ожидалось из особенностей геолого-гидрогеологического строения месторождения и периода строительства рудника, наиболее чувствительными к формированию водопритока в горные выработки Яковлевского месторождения окажутся: на начальном этапе отработки (до техногенной нарушенности ВЗТ) – фильтрационные параметры руднокристаллического водоносного горизонта и вертикальный коэффициент фильтрации нижней части нижнекаменноугольного водоносного горизонта., в последние периоды активной разработки месторождения (2018, 2022 гг.) – фильтрационные параметры нижнекаменноугольного

водоносного горизонта и вертикальная проницаемость водозащитной толщи, определяющая объёмы нисходящего перетекания подземных вод.

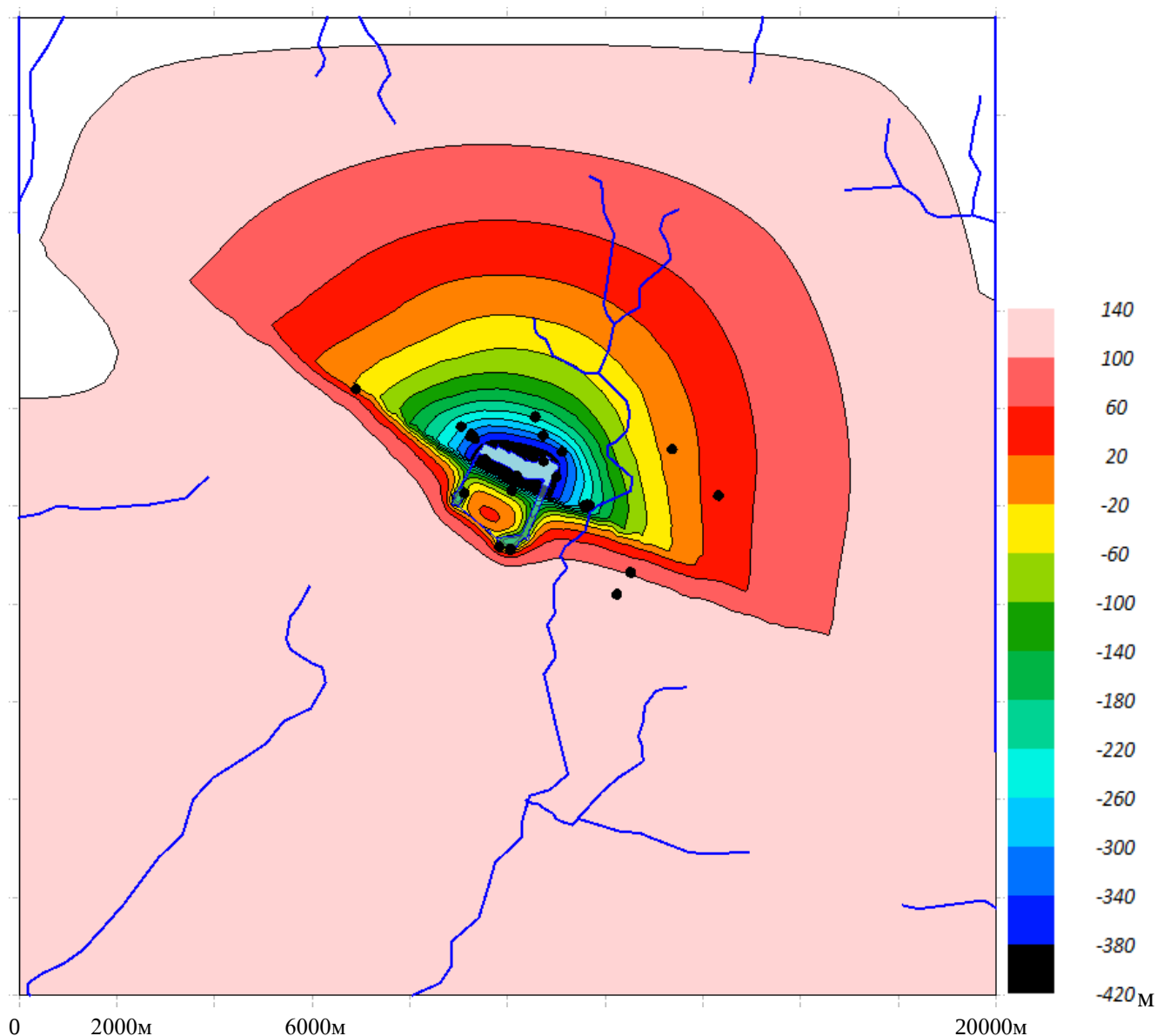


Рисунок 3.16 – Карта техногенных напоров в РВГ (в метрах) по результатам калибровки модели на 2005 г.

Данное обстоятельство объясняется несколькими факторами:

1. низкими емкостными запасами РВГ, и наступлением в нем режима фильтрации близкого к стационарному: при калибровке первого (стационарного периода), соответствующего 2005 году, учитывались уровни и притоки к выработкам, пройденным с 1986 года. То есть на момент 2005 года в РВГ наблюдался близкий к стационарному режим фильтрации, поскольку уже был сооружен дренажный контур, существенно не изменяемый в процессе дальнейшей выемки БЖР. Напорное поле в РВГ представлено на рисунке 3.14. Поскольку депрессионная воронка в РВГ на 2005 год была уже сформирована, а целостность ВЗТ не нарушена выемкой полезного ископаемого, то перетекание из НВГ контролировалось естественной проницаемостью

глинистой прикровельной части ВЗТ, а также установившимися вертикальными градиентами и составляло по результатам моделирования $\sim 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ (10% общего водопритока в рудник);

2. Подработка целика привела к техногенному увеличению вертикальной составляющей его проницаемости, что подтверждается ростом общего водопритока при неизменном контуре дренирования, установившемся режиме фильтрации в РВГ и сработкой его емкостных запасов, а также существенным снижением напоров в НВГ над горными выработками. Решение эпигнозных задач в нестационарной постановке в период с 2005 по 2022 год подтверждает данный тезис и свидетельствует об увеличении вертикального коэффициента фильтрации глинистых отложений в кровле ВЗТ, на 3,5 порядка.

3.3.4 Определение балансовых составляющих водопритока в рудник

Ранее определение закономерности изменения водопритока из РВГ и НВГ гидрохимическим методом показало, что объём водопритока из НВГ экспоненциально возрастал с $1020 \text{ м}^3/\text{сут}$ до $9240 \text{ м}^3/\text{сут}$ в период с 2005 по 2022 гг.

Целесообразно решить данную задачу и гидродинамическим методом, используя построенную математическую геофильтрационную модель. Задание балансовой зоны на подошве нижнекаменноугольного водоносного горизонта и оценка величины перетекания из на каждый расчетный период (год) позволяет получить искомые данные.

Таким образом, хронологические графики изменения величины суточного притока из НВГ по всей площади перетекания, где вертикальный градиент превышает нулевое значение, представлены на рисунке 3.17. Следует заметить, что выявлена высокая сходимость результатов, полученных гидродинамическим и гидрохимическим методами, что указывает на корректность и достоверность полученной закономерности.

Гидродинамический метод иллюстрирует рост водопритока из НВГ с $1470 \text{ м}^3/\text{сут}$ (2005 год) до $9010 \text{ м}^3/\text{сут}$ (2022 год) по экспоненциальному закону. Расхождение в значениях с гидрохимическим методом в нестационарные расчетные периоды не превышает 20% (2014 и 2016 гг.). Следует отметить, что увеличение объёма перетекания после 2005 года (то есть более $1470 \text{ м}^3/\text{сут}$) обеспечивается только ростом вертикального коэффициента фильтрации ВЗТ. Очевидно, что такой рост фильтрационного параметра вызван техногенным влиянием от подработки и деформированием (разуплотнением) пород целика.

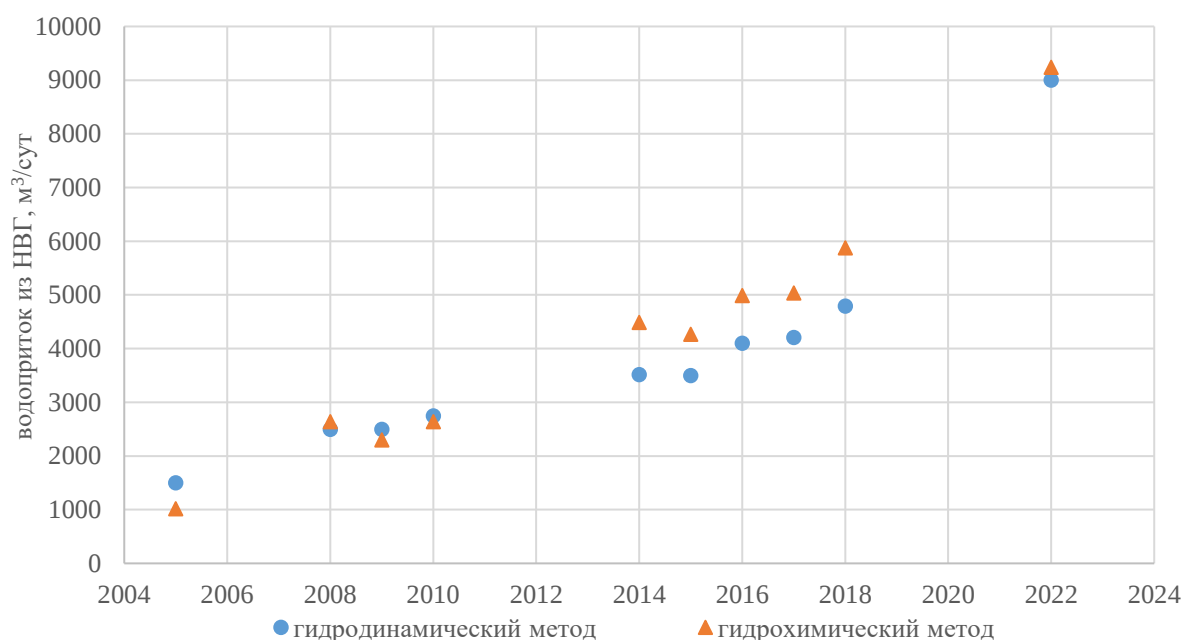


Рисунок 3.17 – Хронологический график изменения величины перетекания из НВГ в процессе отработки Яковлевского месторождения

3.4 Выводы по III главе

На основании анализа хронологического изменения химического состава рудничных вод, понижений уровня подземных вод в НВГ, гидрогеологической съемки рудника, деформаций подошвы водозащитной толщи, дебитов дренажных скважин и водопритока к главному водосборнику были выявлены предпосылки техногенного увеличения проницаемости водозащитной толщи в процессе отработки богатых железных руд.

Гидрохимическим способом, с помощью формул смешения двух растворов проведена оценка балансовых составляющих формирования водопритока к зоне ведения очистных работ с начала эксплуатации Яковлевского рудника (2005-2022 гг.) по двум показателям: общей минерализации подземных и рудничных вод, а также концентрации в них хлорид иона.

Методом математического геофильтрационного моделирования была проведена верификация полученного гидрохимическим способом результата оценки балансовых составляющих формирования водопритока к очистному пространству. Для этой цели была проведена гидродинамическая схематизация гидрогеологических условий Яковлевского месторождения и построена численная геофильтрационная модель в программном комплексе «Нимфа». При этом зона сдвижения (техногенного увеличения проницаемости) задавалась зоной с переменными фильтрационными свойствами во времени.

Сходимость результатов, полученных гидрохимическим и гидродинамическим методами, характеризуется разностью результата не более 20% для периода 2014-2018 гг. и не более 5 % для 2005-2010 гг. и 2022 г., что повышает достоверность полученного результата.

Установлено, что схема формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского месторождения не является статичной, на различных этапах разработки месторождения происходит её изменение: если в начальный период выемки руды (2005-2008 гг.) РВГ действительно играет ключевую роль в общем балансе, то в 2022 г. его роль вторична. Доля РВГ с 2005-2008 гг. по 2022 гг. в среднем по двум методам снижается с 77 % до 13 %, равно как и абсолютная величина водопритока из данного горизонта (с 200 м³/ч до 60 м³/ч). Отдельного внимания в данном случае заслуживает не рост общего водопритока к очистному пространству с 223 м³/ч (2005 г) до 447 м³/ч (2022 г), а девятикратный рост величины водопритока из НВГ (с 43 м³/ч до 386 м³/ч) за рассматриваемый период.

Традиционный подход к прогнозированию водопритока и разработке оптимальной системы осушения месторождения при выемке полезного ископаемого под водным объектом не учитывает данный фактор изменения техногенных гидродинамических условий и может приводить к существенным ошибкам, в особенности на поздних этапах отработки месторождений.

Очевидно, что решения о системе дренирования рудника, положения о формировании инженерно-геологических процессов и гидрогеологическом мониторинге месторождения должны основываться на актуальных гидрогеологических данных.

Обобщая результаты, полученные в III главе, можно сформулировать первое защищаемое положение: *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.*

ГЛАВА IV ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОДОПРИТОКА

4.1 Целесообразность использования эмпирических зависимостей и группы факторов для прогнозирования водопритока к очистным выработкам

Оценка, прогнозирование и контроль гидрогеологических условий ведения горных работ на опасных горных объектах играют важную роль в создании безопасных условий труда человека и повышении эффективности добычи полезного ископаемого.

В настоящее время не существует единой теоретической модели, которая бы с достаточной достоверностью позволяла оценить изменение проницаемости массива песчано-глинистых пород при его подработке. Как следствие, прогнозирование величины водопритока в выработки, формируемого при нисходящей фильтрации подземных вод через такой массив, на основе теоретической модели не представляется возможным. Существуют лишь методики оценки водопритока в аварийной ситуации и выявления критериев её наступления, при которой происходит разрушение с образованием водопроводящих трещин либо выпор горных пород (подробнее в разделе 1.2) [103]. Как правило, при этом водоприток в горные выработки определяется проводимостью вышележащего водного объекта и градиентом перетекания [104].

В условиях Яковлевского месторождения осуществляется нисходящее перетекание подземных вод из НВГ через водозащитный целик, техногенная нарушенность которого, как было показано в III главе, растет во времени. При сохранении контура дренирования и снижении величины градиента фильтрации происходит увеличение фильтрационных параметров пород водозащитной толщи. В таких обстоятельствах актуальность вопроса прогнозирования водопритока к очистному пространству не вызывает вопросов. Однако, количественная оценка проницаемости целика опытно-фильтрационными исследованиями в процессе отработки месторождения сопряжена с рисками.

В данном случае преимуществом обладают эмпирические зависимости, полученные для гидрогеологических условий конкретного месторождения, позволяющие на основе рабочих оперативных и проектных геомеханических параметров ведения горных работ или показателей гидрогеологических условий отработки месторождения, фиксируемых в рамках мониторинга среды, прогнозировать ожидаемые величины водопритока к отдельным участкам рудника, получать характеристики схемы формирования водопритока в интересующий момент времени. Очевидно, что для выявления данных зависимостей факторы, участвующие в таком анализе, должны базироваться на предпосылках теории фильтрации и техногенного увеличения проницаемости горных пород [105].

Среди факторов, влияющих и выступающих следствием техногенного увеличения проницаемости, и связанную с ним величину поступающего в горные выработки водопритока из водоносных горизонтов, можно выделить три основные группы:

- горные – количество пройденных в погонных метрах горных выработок, объем отбитой горной массы, приращение объема незаложенных пустот;
- геомеханические – абсолютные величины 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.

4.2 Связь водопритока к очистным выработкам с горными факторами

Первичная и повторная подработка массива приводит к образованию зон сдвижения горных пород, росту деформаций в кровле и бортах горных выработок. Согласно теоретическим представлениям, сдвижение горных пород начинается с прогиба слоев кровли выработок в сторону выработанного пространства, при этом вышележащий массив подвергается деформациям изгиба аналогично плите, защемленной по краям. По мере увеличения количества пустот и площади выработанного пространства прогиб увеличивается, в сдвижение вовлекается все больший объем пород, формируется мульда сдвижения [106].

В породах с хрупким характером разрушения начинают возникать трещины напластования и нормально секущие трещины, приводящие к резкому, скачкообразному росту проницаемости [38]. Породы склонные к пластическим деформациям начинают разуплотняться, пустоты в них формируются рассредоточенно, распределяясь на весь вовлеченный в процесс сдвижения объем [107]. Очевидно, что проницаемость горных пород увеличивается и в этом случае, однако, происходит это более плавно, что позволяет выявить предполагаемые закономерности между горными факторами и величиной водопритока, отвечающей определённой степени проницаемости вышележащего массива.

Среди показателей группы горных факторов отработки месторождения ведётся годовой учет о проходке выработок и заложенных пустотах. При проходке фиксируется количество пройденных погонных метров и совокупный объем отбитой горной массы.

Как отмечалось ранее, расчетные данные о водопритоке к очистным выработкам в период с 2011 по 2013 гг. не будут использованы в анализе, так как в этот период велись технические работы с дренажной системой рудника и наблюдается низкая прееменственность измерений.

Графики сопоставления часового водопритока из НВГ и РВГ к очистным выработкам, полученного по среднему арифметическому из значений минерализации и хлорид иона (раздел 3.2), с количеством погонных метров, пройденных в соответствующий год, демонстрируют наличие сильной корреляционной зависимости. Для НВГ коэффициент корреляции составил 0,89, для РВГ характерна отрицательная связь с коэффициентом корреляции -0,94 (рис. 4.1). Однако, корреляция между среднегодовым водопритоком к очистным выработкам из двух водоносных горизонтов и суммарной проходкой выработок в погонных метрах средняя ($r = 0,62$). Данное обстоятельство связано с постепенным перераспределением долей между НВГ и РВГ в общем балансе и незначительным ростом общего водопритока к очистному пространству.

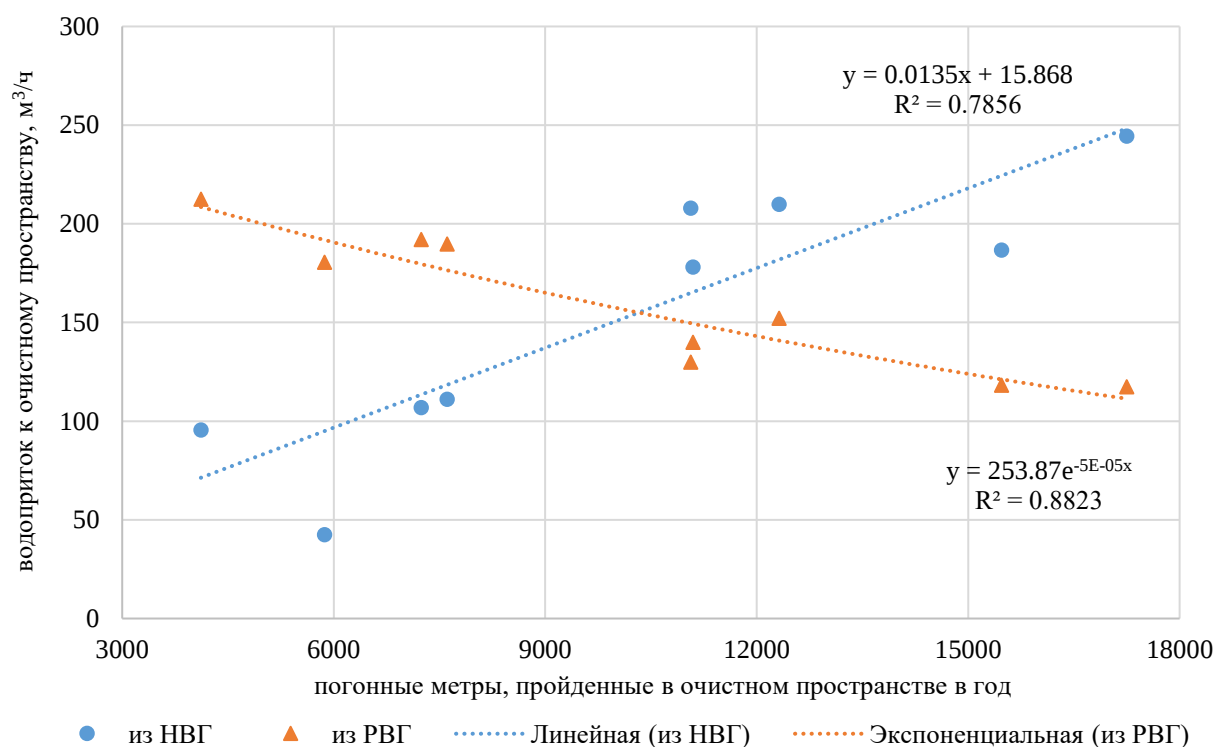


Рисунок 4.1 – Корреляционное поле сопоставления среднегодового водопритока к очистному пространству и суммы пройденных погонных метров горных выработок

Следующим из группы горных факторов рассматривался суммарный годовой объем отбитой породной массы. Его величина хоть и связана с погонной проходкой горных выработок, однако, ввиду наличия разной геометрии и видов выработок, их следует анализировать отдельно.

Корреляционная зависимость между годовым объемом отбитой породы в очистном пространстве и среднегодовым водопритоком из НВГ и РВГ характеризуется коэффициентом корреляции 0,83 для НВГ и -0,93 для РВГ, что в целом незначительно ниже, но соответствует погонному метражу проходки (рис. 4.2).

Оба показателя горных работ демонстрируют высокую корреляционную связь с составляющими водопритока к очистному пространству. Однако, с величиной суммарного водопритока к этой зоне связь в обоих рассмотренных случаях средняя, а коэффициент корреляции не превышает 0,62. В данном случае применение зависимостей погонной проходки и объема отбитой породы в год от общего водопритока ко II балансовой зоне для прогноза статистически не соответствует выбранным критериям.

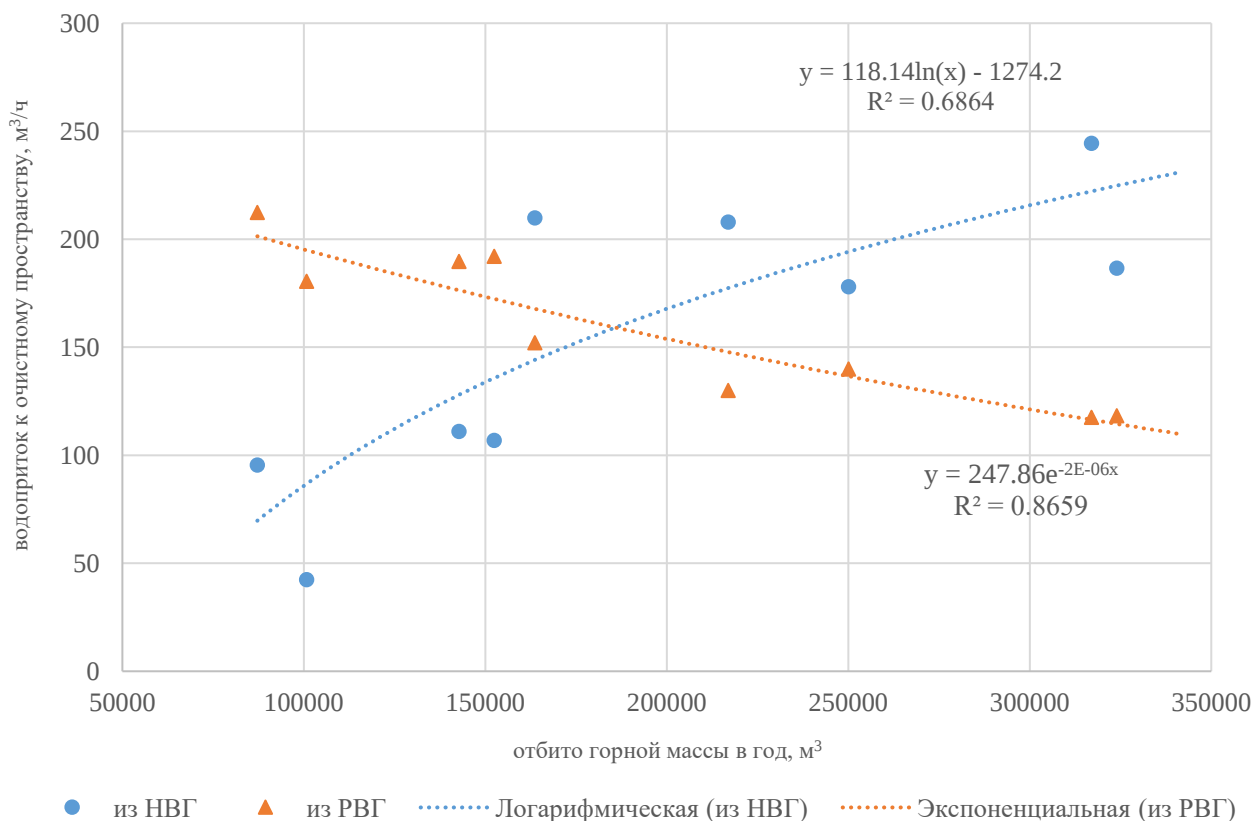


Рисунок 4.2 – Корреляционное поле сопоставления среднегодового водопритока к очистному пространству и объема отбитой руды в год

Согласно проектным решениям разработка Яковлевского месторождения осуществляется нисходящей слоевой системой с закладкой выработанного пространства. Часть сформированных при добыче пустот ежегодно закладывается твердеющими смесями, что в целом контролирует общее количество пустот, но не предотвращает их рост.

Исходя из данных о совокупном объеме отбитой горной массы и сведениях о заложенных пустотах в очистном пространстве, была рассчитана величина приращения совокупного объема пустот на 2005 и 2008-2018 гг.

Таким образом, при сопоставлении с величинами водопритока рассматривается не абсолютный объем пустотного пространства, а накопительная сумма его приращений на каждый из рассматриваемых годов (таблица 4.1). Графики с коэффициентом детерминации и

уравнениями регрессий для НВГ и РВГ представлены на рисунке 4.3. Коэффициенты корреляции для НВГ и РВГ составили 0,96 и -0,9 соответственно.

Таблица 4.1 – Показатели горных работ в период с 2008 по 2018 гг.

Год	Протяжённость пройденных выработок, м	Объем отбитой горной массы, м ³	Объём заложенного пространства, м ³	Сумма приращений пустот, м ³
2005	5870	100807	78000	22807
2008	7608	142818	77664	134583
2009	4116	87177	88751	133009
2010	7244	152462	139630	145841
2011	14213	306945	233975	218811
2012	14865	341351	244204	315958
2013	14816	314632	244000	386590
2014	15474	327990	245400	469180
2015	11099	250128	241300	478008
2016	4856	116984	122197	472795
2017	12318	263694	245770	490719
2018	17250	317058	305599	502178

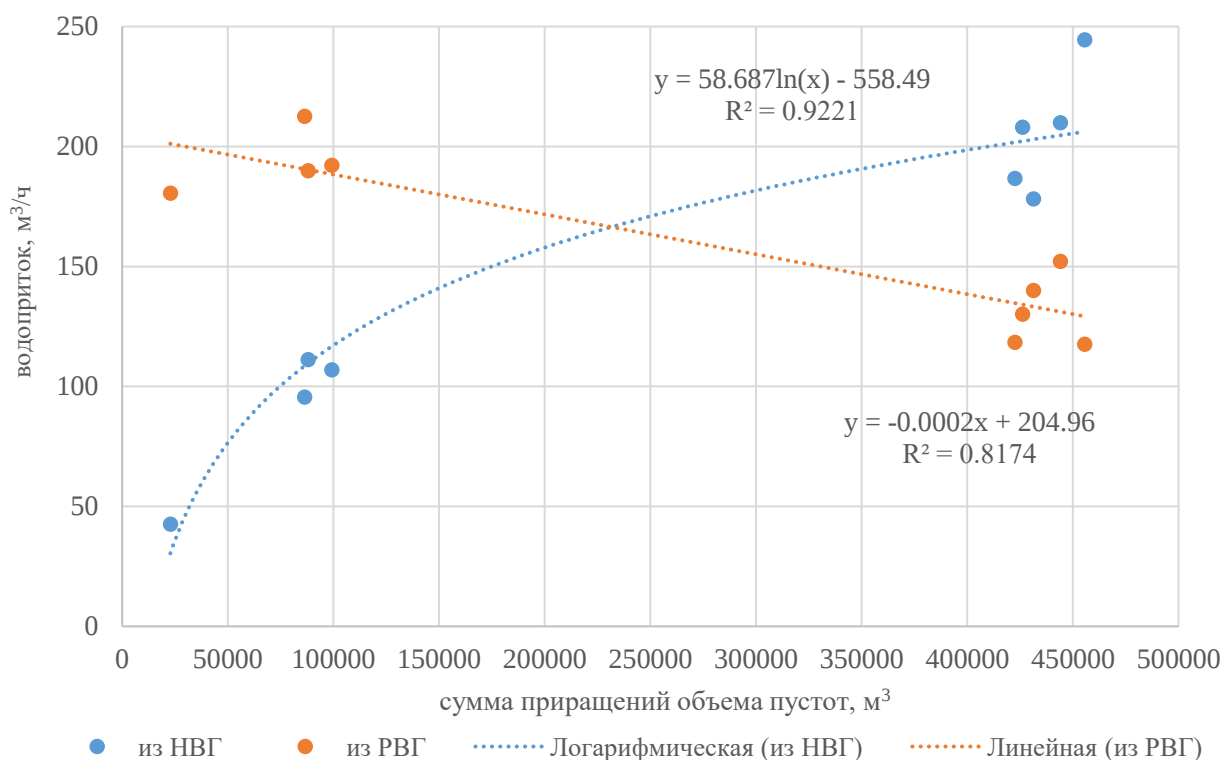


Рисунок 4.3 – Корреляционное поле сопоставления среднегодового водопритока к очистному пространству из НВГ и РВГ и суммы приращений пустот

Также, при рассмотрении показателя суммы приращения пустот наблюдается корреляция с общим водопритоком к II балансовой зоне (рис. 4.4). Коэффициент корреляции при этом составил 0,91.

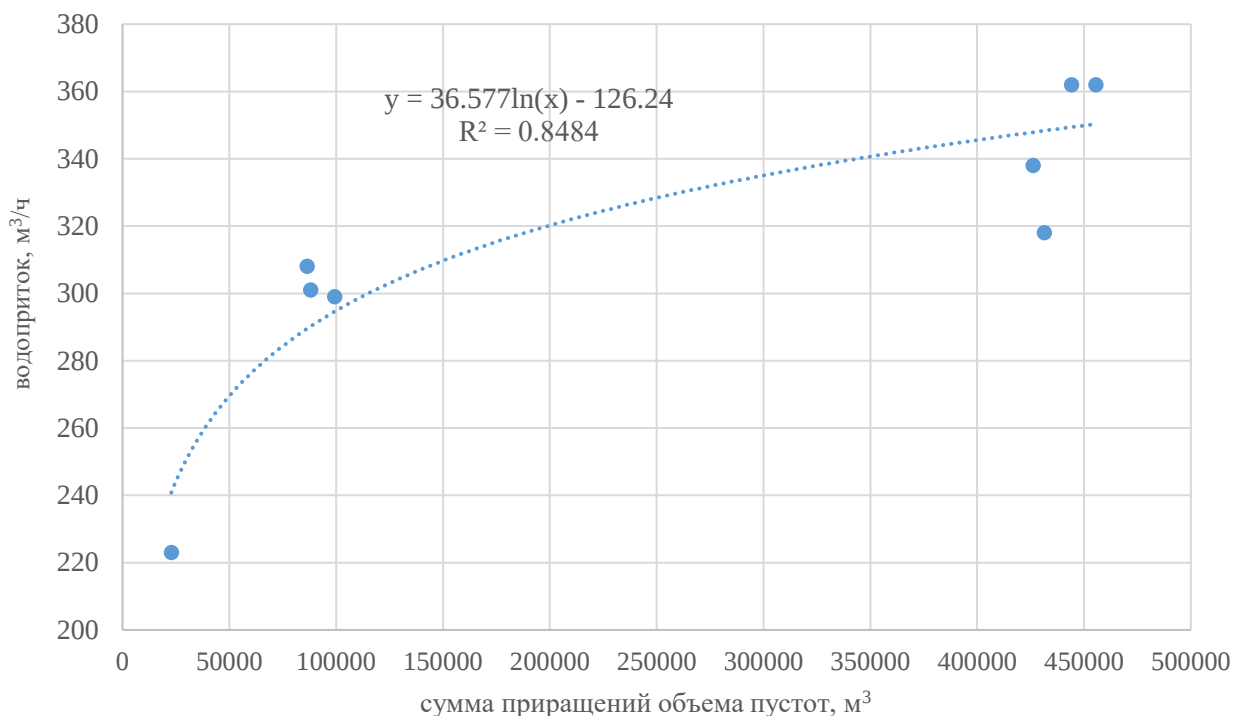


Рисунок 4.4 – Корреляционное поле сопоставления общего водопритока к очистному пространству и суммы приращений пустот

Обобщая полученный результат, можно сделать вывод, что предложенные горные факторы отработки месторождения могут с высокой достоверностью использоваться для прогнозирования изменения составляющих в общем балансе водопритока к II зоне.

Наиболее тесную связь с долей водопритока из НВГ демонстрирует сумма приращений пустот ($r = 0,96$). Однако показатели погонной проходки и объема отбойки также характеризуются высокими коэффициентами корреляции, составляющими 0,89 и 0,83 соответственно.

Доля водопритока из РВГ к очистным выработкам имеет сильную отрицательную связь со всеми предложенным горными факторами, при этом модули значений коэффициентов корреляции не опускаются ниже 0,9. Однако, теория формирования водопритока к горным выработкам указывает на то, что такое поведение доли РВГ связано с конечным этапом его дренирования при текущем контуре ведения горных работ, а не с фактором техногенной нарушенности массива, что указывает на невозможность использования этих зависимостей для прогноза доли водопритока из РВГ. В данном случае, при сохранении геометрии контура выработок, целесообразно использовать хронологические зависимости изменения доли РВГ в общем балансе II зоны (раздел 3.2).

Среднегодовая величина общего водопритока к очистному пространству статистически значимо для целей прогнозирования коррелирует только с величиной суммарного приращения пустот. Коэффициент корреляции при этом составляет 0,91, что соответствует выбранным критериям и согласуется с теоретическими предпосылками.

4.3 Связь водопритока к очистным выработкам с геомеханическими факторами

Объектный геомеханический мониторинг среды при отработке месторождений полезных ископаемых под водными объектами в первую очередь осуществляется путем контроля за деформациями дневной поверхности и кровли 0-го слоя на границе с водозащитным целиком.

На Яковлевском месторождении мониторинговой службой также производится сбор данных об оседании реперов поверхностной и подземной наблюдательных станций, формируется база данных изменения абсолютных отметок реперов.

Наблюдения за оседаниями дневной поверхности над очистным пространством ведутся с помощью 5-и профилей, среди которых три расположены вкрест простирания рудного тела, а остальные по простиранию. Совокупность реперов для фиксации изменения абсолютных отметок рудной потолочины (подземной станции) не выражен в конкретных профильных линиях, но разделяется по технологическим блокам. Наблюдения характеризуются слабой преемственностью и небольшим периодом измерений, который для большинства из них не превышает 5-7 лет.

В связи с этим, для оценки корреляционных связей использовались рассчитанные величины максимальных оседаний на каждый из рассматриваемых годов. Оседания дневной поверхности и подошвы водозащитного целика по годам, а также их максимальные значения представлены на рисунке 4.5.

Безусловно, формирование зон разуплотнения в теле водозащитной толщи приводит к увеличению количества пустот и размера порового пространства, что обеспечивает увеличение проницаемости целика и величины водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника.

В качестве первых корреляционных пар выступали величины водопритока к очистному пространству из водоносных горизонтов нижнего комплекса и максимальных оседаний реперов подземной станции (рисунок 4.6). Из графика видно, что существуют сильные корреляционные связи водопритока из НВГ и РВГ с максимальными деформациями рудной потолочины, характеризующиеся коэффициентами корреляции 0,99 и -0,98 соответственно. Рост деформаций водозащитной толщи приводит к увеличению как доли, так и абсолютной величины водопритока из НВГ. Высокие значения коэффициентов корреляции и теоретические предпосылки техногенного увеличения проницаемости подрабатываемого целика указывают на возможность использования величин оседания рудной потолочины в прогнозных целях.

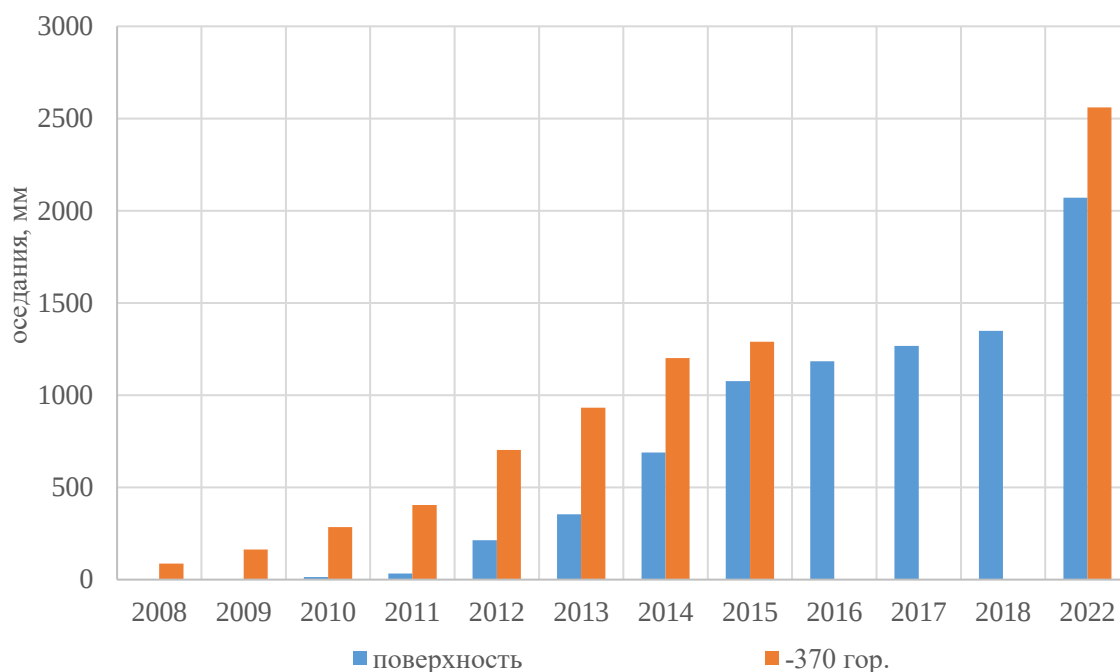


Рисунок 4.5 – Гистограмма распределения максимальных оседаний реперов поверхностной и подземной наблюдательных станций

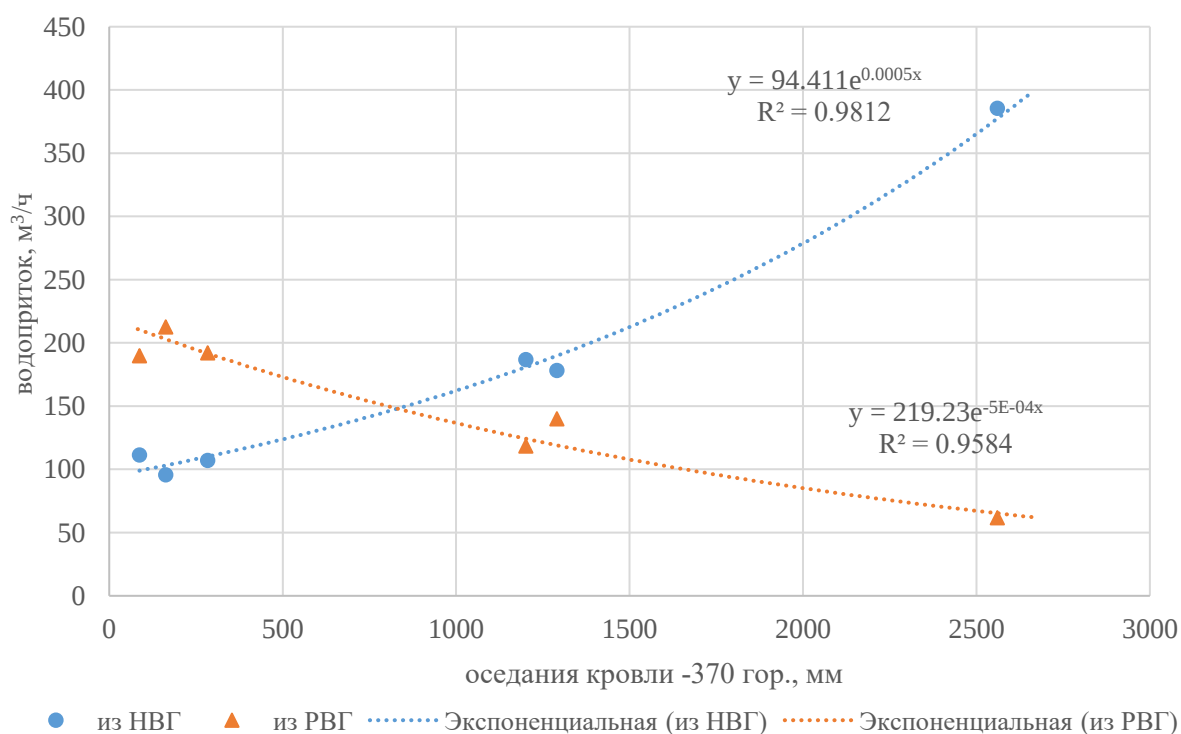


Рисунок 4.6 – Корреляционное поле сопоставления водопритоков из НВГ и РВГ с максимальными оседаниями реперов подземной наблюдательной станции

Второй корреляционной парой являются максимальные оседания дневной поверхности и величины водопритока к очистному пространству из НВГ и РВГ (рис. 4.7). Как и в первом случае, сохраняются сильные связи между составляющими водопритока к II балансовой зоне и деформациями, однако, коэффициенты корреляции незначительно ниже и составляют 0,97 и -0,86 для НВГ и РВГ соответственно.

Оседания земной поверхности являются отражением не только процесса оседания кровли горных выработок, но и снижения напоров в водоносных горизонтах нижнего и верхнего комплексов. При этом непосредственно в формировании водопритока участвуют горизонты нижнего комплекса. Этим может объясняется незначительно более слабая связь с водопритоком в отличие от деформаций кровли горных выработок.

В связи с вторичной ролью оседания земной поверхности относительно деформаций кровли выработок, а также комплексностью процесса, фактор может быть применён на практике только совместно с другими, более тесно пространственно и аналитически связанными с водопритоком.

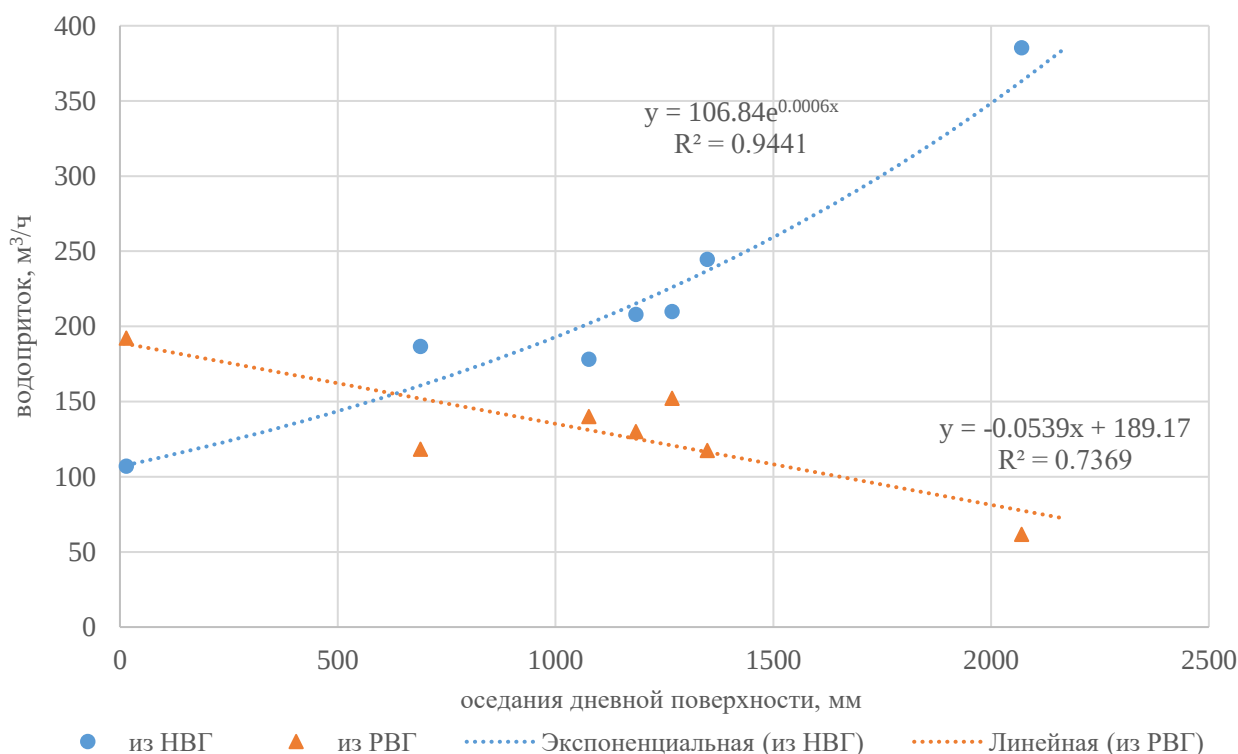


Рисунок 4.7 – Корреляционное поле сопоставления водопритоков из НВГ и РВГ с максимальными оседаниями реперов поверхностной наблюдательной станции

При сопоставлении общего водопритока к II балансовой зоне с максимальными оседаниями реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций наблюдается их сильная связь (рис. 4.8). Коэффициенты корреляции для подземной и поверхностной станций составляют 0,93 и 0,91. Максимальные коэффициенты детерминации указывают на близость их связи к логарифмическому закону. Ввиду наличия нескольких процессов, приводящих к оседанию дневной поверхности, значения прогнозных водопритоков будут завышенными, поэтому кривая регрессии с оседаниями реперов подземной станции имеет большую достоверность.

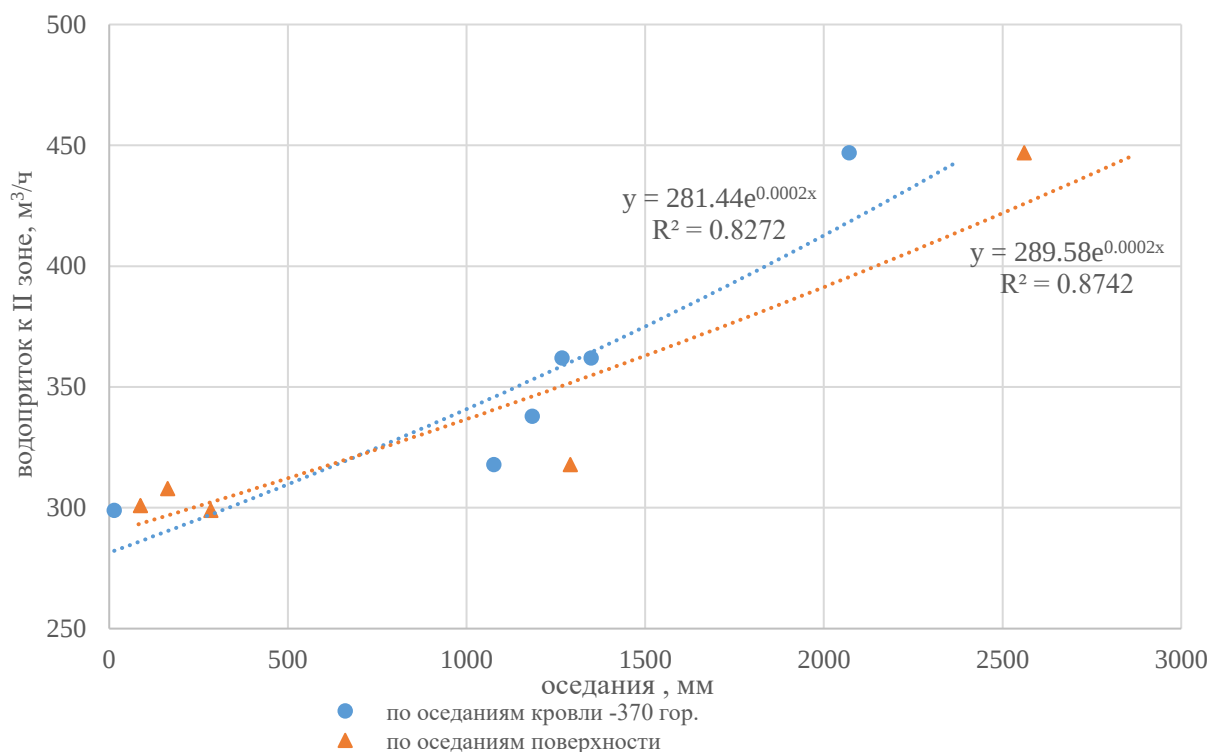


Рисунок 4.8 – Корреляционное поле сопоставления общего водопритока к очистным выработкам с максимальными оседаниями реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций

В целом, при сопоставлении величин оседания реперов подземной и поверхностной станций с водопритоком из водоносных горизонтов к очистным выработкам наблюдается теоретически ожидаемый результат: рост деформаций подошвы водозащитного целика приводит к экспоненциальному росту величины водопритока из НВГ и общего водопритока к II балансовой зоне на фоне снижения водопритока из РВГ по линейному закону.

Прогноз общего водопритока по величинам максимальных оседаний дневной поверхности будет давать завышенный результат ввиду наличия составляющей оседания, вызванного снижением уровня подземных вод в водоносных горизонтах верхнего и нижнего комплексов. Для практических целей составления прогнозов общего водопритока к выработкам очистного пространства целесообразно использовать зависимости, полученные по деформациям реперов подземной станции. Данное обстоятельство повышает актуальность совершенствования комплексного гидрогеомеханического мониторинга среды при отработке Яковлевского месторождения.

4.4 Гидрогеологические факторы прогнозирования водопритока к очистным выработкам

Совокупность гидрогеологических показателей, фиксируемых в рамках гидрогеологического мониторинга на Яковлевском месторождении, включает в себя наблюдения за изменениями уровней подземных вод во всех водоносных горизонтах, представленных в разрезе, учет суммарного водопритока к главному рудничному водосборнику

по производительности насосного оборудования, замеры дебитов дренажных скважин, отбор проб на химический анализ как из главного водосборника, так и из высокодебитных дренажных скважин и участков обильных водопроявлений в горные выработки. Согласно регламенту ведения мониторинга, измерения выполняются раз в месяц.

Ввиду изолированности нижнего водоносного комплекса региональным водоупором, влияние водозаборов, атмосферы и других поверхностных факторов на уровни подземных вод НВГ и РВГ сводится к минимуму (раздел 2.1.3) [86]. При этом, сам рудник выступает в главной роли изменения гидрогеологических условий месторождения. Например, как было показано в разделе 2.1.4, значительные колебания уровней подземных вод в НВГ в 2011-2014 гг. и 2019-2020 гг. являются следствием изменения конфигурации дренажной системы рудника.

Не смотря на то, что поведение уровней подземных вод в водоносных горизонтах нижнего комплекса является следствием дренажного эффекта рудника и, согласно теоретическим предпосылкам теории фильтрации подземных вод, должно происходить параллельно, данный показатель может рассматриваться для составления прогноза водопритока в рудник ввиду наличия многолетней тенденции изменения уровней в НВГ и РВГ (раздел 2.1.4).

Сведения о понижении уровня подземных вод от естественного в НВГ были получены по скважине 28 кр, которая находится непосредственно над очистными выработками и имеет представительный хронологический ряд измерений (таблица 4.2). Сопоставление величины понижения уровня подземных вод в НВГ от среднегодового водопритока к очистным выработкам из НВГ, полученной объемно-весовым методом по минерализации и хлорид иону, указывает на наличие между корреляционной парой сильной положительной линейной связи с коэффициентом корреляции 0,91 (рис. 4.9). Также сильная положительная связь существует между общим среднегодовым водопритоком ко II балансовой зоне и понижением в НВГ, которая характеризуется коэффициентом корреляции 0,98. Связь между данными показателями подтверждает представления о схеме формирования водопритока к очистным выработкам, сформулированные в III главе.

Вместе с тем, тангенс угла наклона линейного тренда, полученного для водопритока из НВГ к II зоне, свидетельствует об ожидаемом продолжении процесса замещения доли НВГ в общем балансе водопритока к очистным выработкам. Стоит полагать, что в будущем доля водопритока из НВГ не вырастет до 100% а её ежегодное приращение будет уменьшаться по экспоненциальной зависимости, однако, в настоящее время этот процесс носит линейный характер.

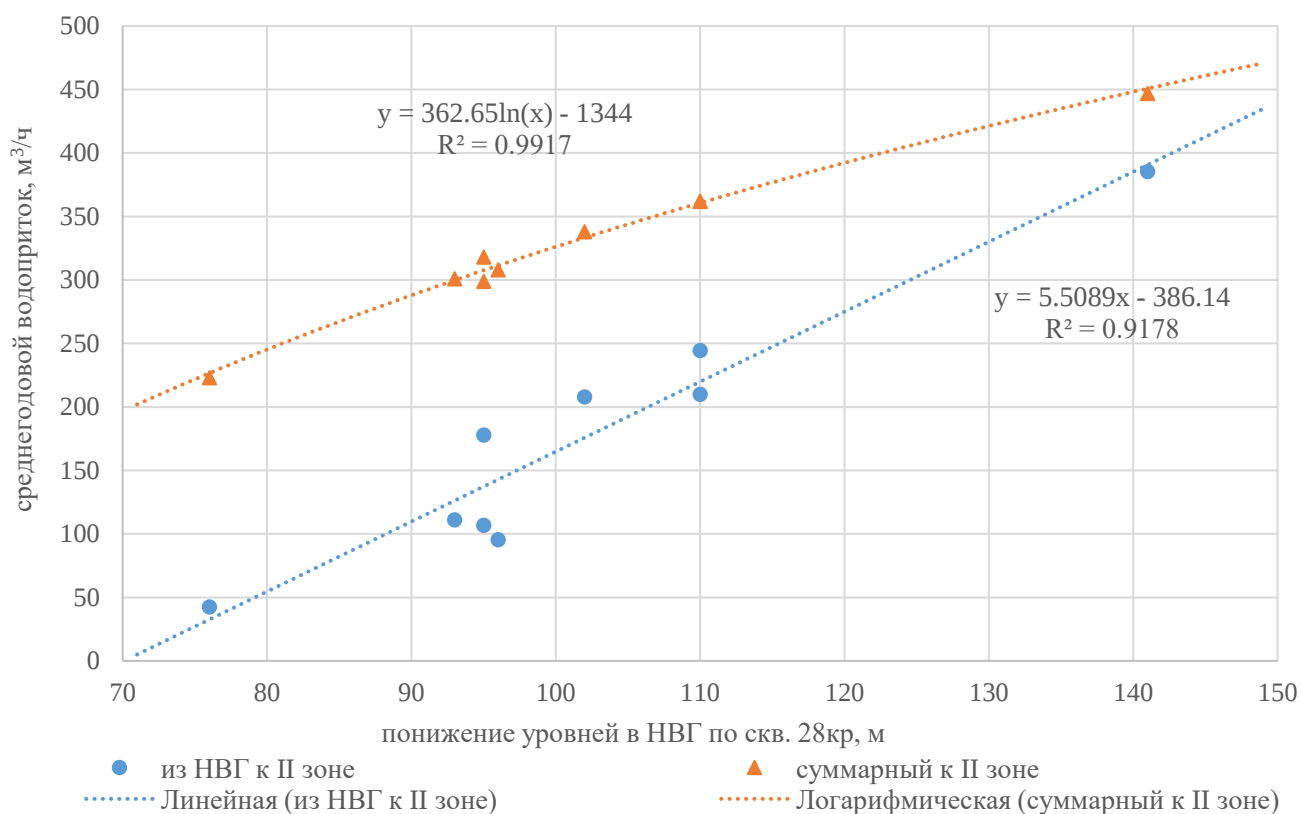


Рисунок 4.9 – Корреляционное поле сопоставления водопритока отдельно из НВГ и суммарного к II балансовой зоне с понижением уровней подземных вод в НВГ

Таблица 4.2 – Величины понижений напоров в НВГ и РВГ

Год	Понижение в наблюдательной скважине относительно естественного уровня подземных вод, м	
	28 кр (НВГ)	610 (РВГ)
2005	76	442
2008	93	459
2009	96	462,7
2010	95	464,2
2011	96	465,2
2012	82	465,6
2013	71	465
2014	87	465
2015	95	465,52
2016	102	466,1
2017	110	467,2
2018	110	468
2022	141	473,2

Вместе с тем, тангенс угла наклона линейного тренда, полученного для водопритока из НВГ к II зоне, свидетельствует об ожидаемом продолжении процесса замещения доли НВГ в общем балансе водопритока к очистным выработкам. Стоит полагать, что в будущем доля водопритока из НВГ не вырастет до 100% а её ежегодное приращение будет уменьшаться по

экспоненциальной зависимости, однако, в настоящее время этот процесс носит линейный характер.

Аналогичные корреляционные поля по РВГ представлены на рисунке 4.10. Расчетной скважиной при вычислении понижений была выбрана 610, имеющая представительный ряд наблюдений и близкое расположение к горным выработкам (таблица 4.2). Для понижения в РВГ также характерна сильная связь с суммарным водопритоком к II балансовой зоне с коэффициентом корреляции 0,89, однако, связь с водопритоком только из РВГ оценивается как средняя отрицательная и не может использоваться в прогнозных целях.

В целом, можно отметить, что существуют сильные корреляционные связи между понижениями в НВГ и РВГ в районе очистных выработок и величиной суммарного водопритока к II балансовой зоне, позволяющие в рамках существующего проекта отработки месторождения строить прогнозы на будущее. Прогнозирование водопритока из каждого водоносного горизонта в отдельности на основе сведений о понижении уровней подземных вод может использоваться только для НВГ.

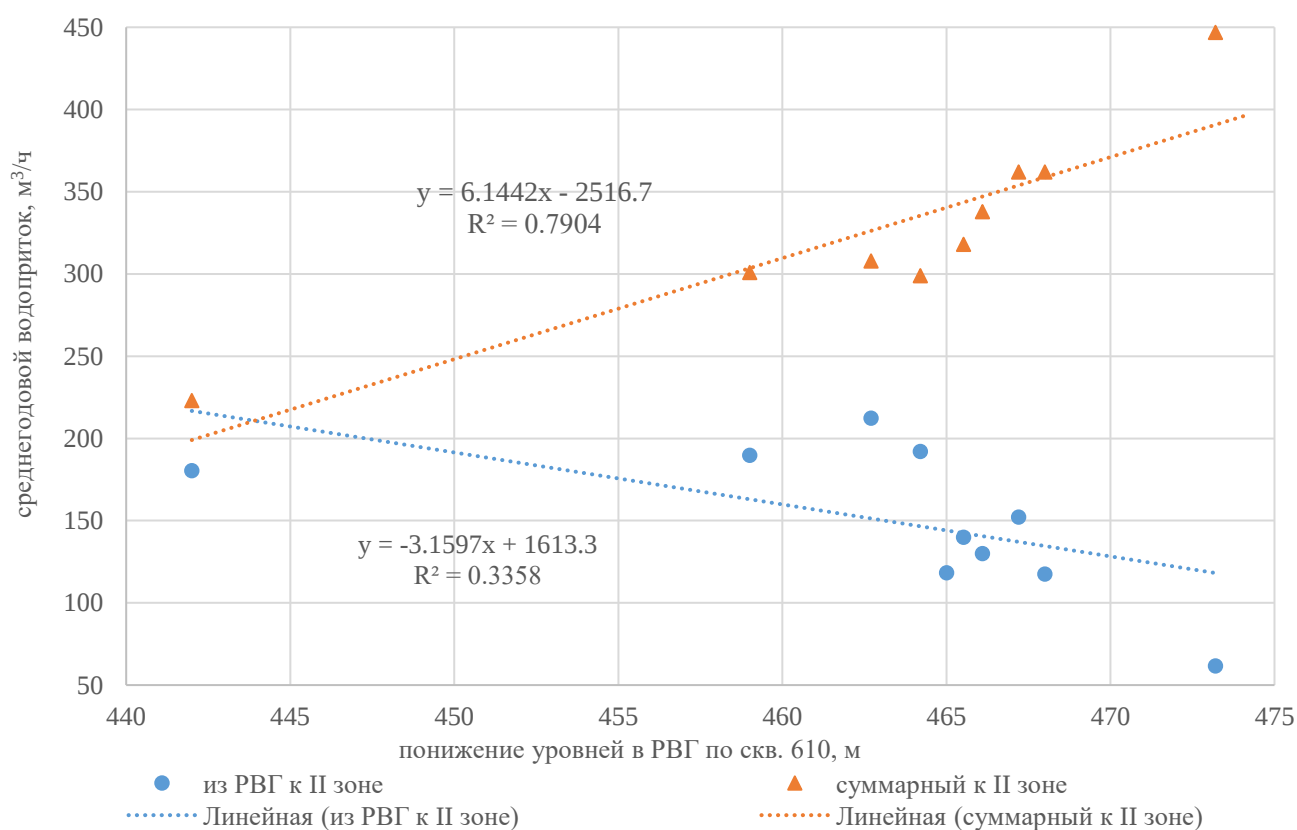


Рисунок 4.10 – Корреляционное поле сопоставления водопритока отдельно из РВГ и суммарного к II балансовой зоне с понижением уровней подземных вод в РВГ

Фиксируемые показатели минерализации и концентрации хлорид иона в дренажных водах главного рудничного водосборника демонстрируют высокий потенциал для прогнозирования водопритока к очистным выработкам. Удобство данного метода также сложно переоценить ввиду простоты его использования при наличии соответствующего оборудования

для оперативной оценки предложенных показателей, что было успешно апробировано на руднике в 2022 г.

Изменение показателя минерализации в главном водосборнике сильно коррелирует с величинами водопритока из НВГ и РВГ к очистным выработкам в отдельности с коэффициентами корреляции -0,9 и 0,92 соответственно (рис. 4.11). Увеличение минерализации закономерно приводит к росту доли РВГ и снижению доли НВГ, что согласуется с гидрохимическими особенностями водоносных горизонтов нижнего комплекса и установленной схемой формирования водопритока.

Корреляция между содержанием в главном водосборнике хлорид иона и величинами водопритока из НВГ и РВГ к очистным выработкам также является сильной и характеризуется коэффициентами корреляции -0,95 и 0,87 (рис. 4.12). По аналогии с минерализацией при снижении концентрации хлорид иона происходит постепенное замещение доли РВГ долей НВГ, что позволяет с высокой достоверностью предсказать эволюцию схемы формирования водопритока при смене химического состава дренажных вод в главном водосборнике.

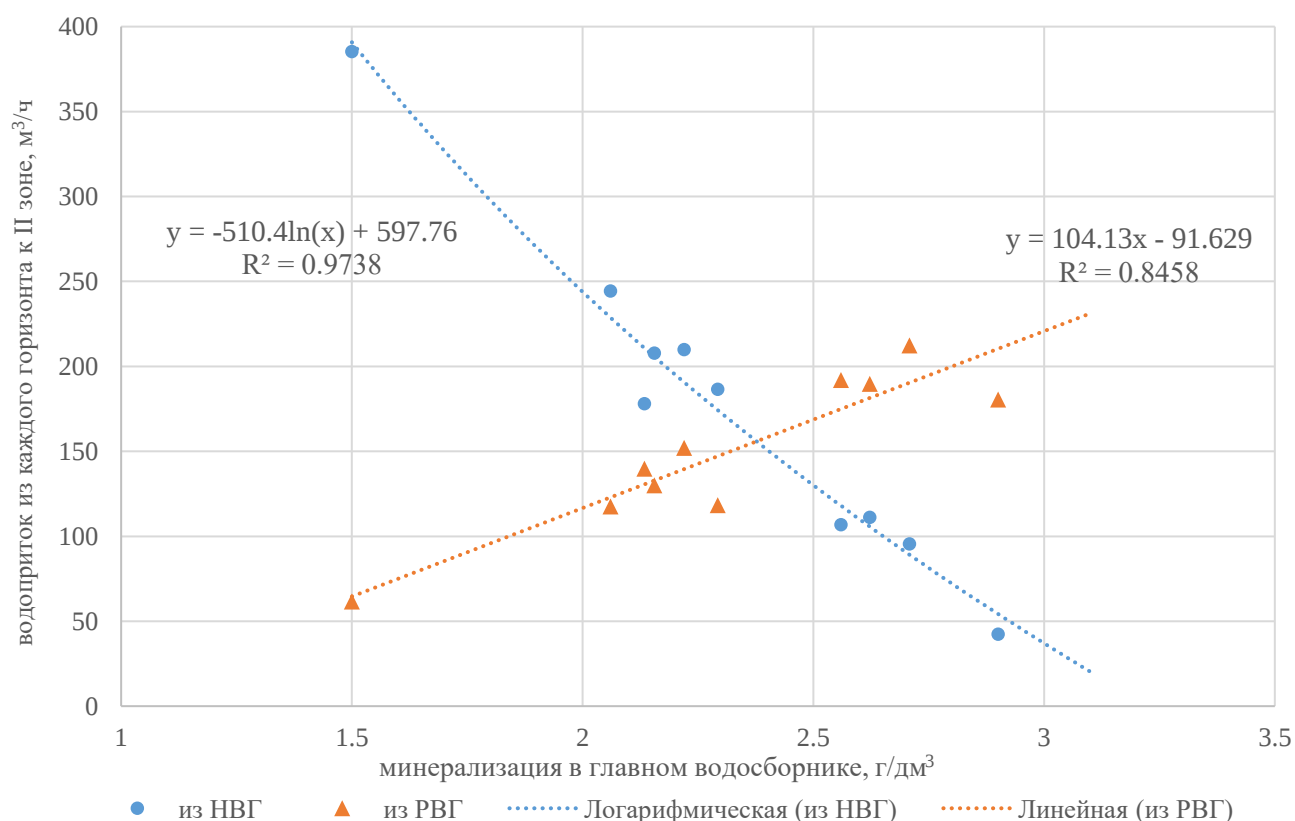


Рисунок 4.11 – Корреляционное поле сопоставления водопритоков из НВГ и РВГ к очистному пространству с минерализацией дренажных вод в главном водосборнике в 2005 г., 2008-2018 гг. и 2022 г.

Такой подход весьма эффективен и с точки зрения прогнозирования общего водопритока к II зоне (рис. 4.13).

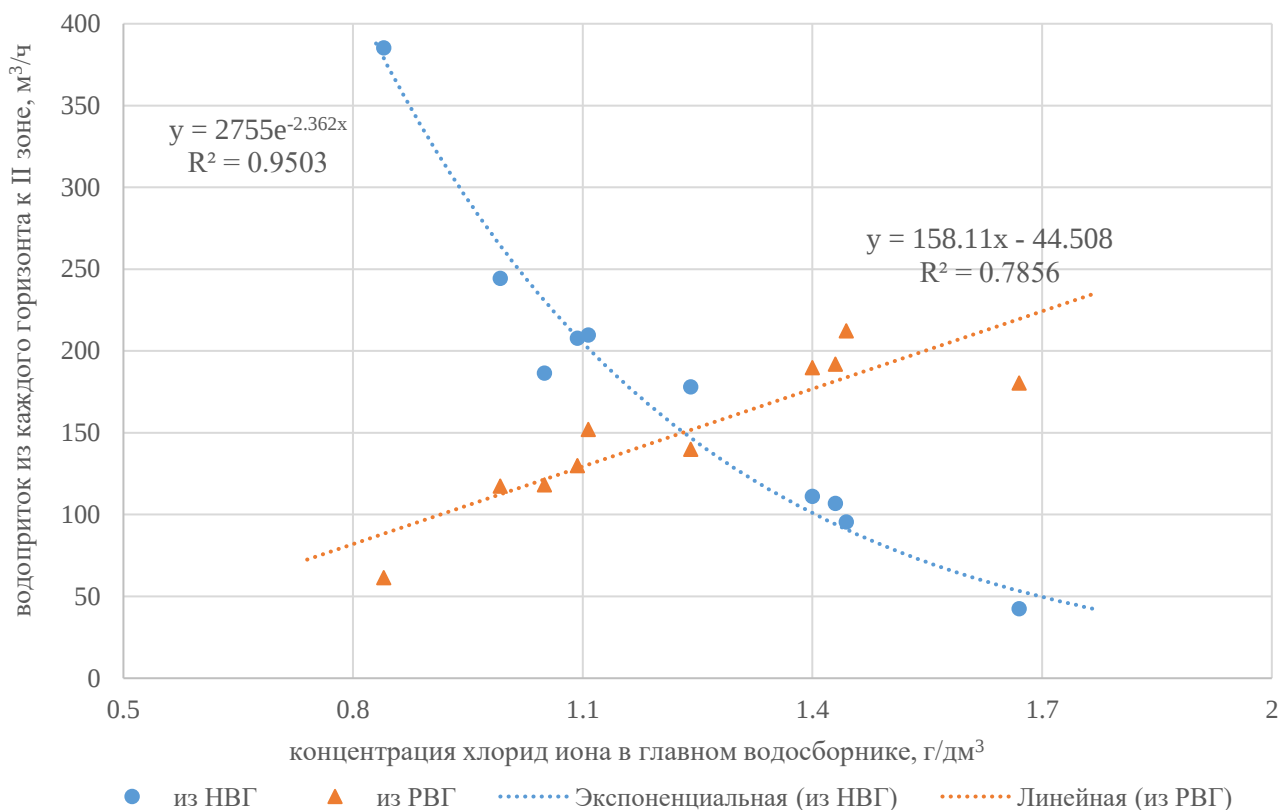


Рисунок 4.12 – Корреляционное поле сопоставления водопритоков из НВГ и РВГ к очистному пространству с содержанием хлорид иона в дренажных водах главного водосборника в 2005 г., 2008-2018 гг. и 2022 г.

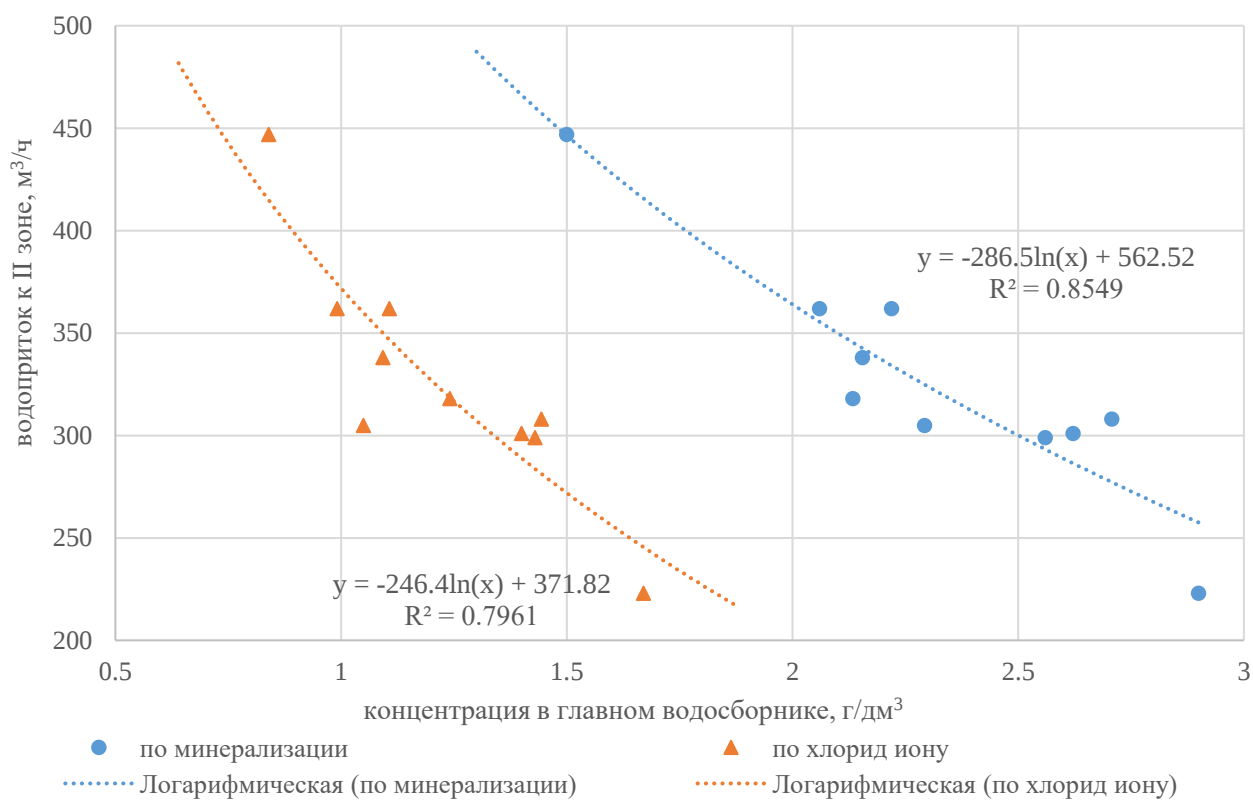


Рисунок 4.13 – Корреляционное поле сопоставления водопритока к очистному пространству с содержанием хлорид иона и минерализацией в дренажных водах главного водосборника в 2005 г., 2008-2018 гг. и 2022 г.

Модули коэффициентов корреляции по обоим показателям превышают 0,88, а зависимости могут рассматриваться как для получения ожидаемых величин водопритока к очистным выработкам, так и наоборот, что может быть актуально с точки зрения управления утилизацией дренажных вод.

Таким образом, полученные зависимости между водопритоком к очистным выработкам и гидрогеологическими факторами при отработке месторождения характеризуются сильной связью, удовлетворяют теории фильтрации и рекомендуемому критерию применения в практических целях, могут использоваться для решения прогнозных задач при сохранении технологии выемки полезного ископаемого.

4.5 Определение закономерностей изменения проницаемости водозащитной толщи

Установление корреляционных связей предложенных факторов с водопритоком к очистному пространству имеет практическую значимость при сохранении контура дренирования на первоочередном участке отработки месторождения. Дальнейшая разработка месторождения предусматривает расширение фронта работ в плане на северо-запад и юго-восток по простиранию рудной полосы. Учитывая аналогичные геолого-структурные характеристики богатых железных руд на прилегающих участках, целесообразным является определение функции изменения проницаемости в виде конкретного параметра, определяемого интенсивностью техногенной нарушенности при подработке водозащитной толщи. Данный подход имеет практическую значимость для расчета водопритока при проектировании разработки последующих очередей на разных этапах эксплуатации рудника.

Усреднённый вертикальный коэффициент фильтрации ВЗТ по плану ведения горных работ или над отдельным блоком может являться таким параметром, однако, сложность и недостаточная изученность процесса разуплотнения толщи в разрезе не позволяет теоретически корректно обосновать его изменение по вертикали. Более обоснованной альтернативой ему может служить эквивалентное фильтрационное сопротивление Φ , предложенное в работах Мироненко В.А. по аналоговому гидрогеологическому моделированию, представляющее собой для вертикальной фильтрации отношение перепада напоров (на кровле и подошве ВЗТ) и расхода подземных вод, поступающего через определённое сечение (ВЗТ).

В действительности, фильтрационное сопротивление и средний вертикальный коэффициент фильтрации ВЗТ связаны между собой определённой константой, учитывающей геометрические характеристики подрабатываемого целика. В условиях данной задачи она составляет ~ 30000 .

При геофильтрационном моделировании техногенного гидродинамического режима Яковлевского месторождения (раздел 3.3) путем решения эпигнозной задачи на

предшествующие годы разработки (с 2005 по 2022 гг.) и калибровки переменного во времени вертикального коэффициента фильтрации в заданной зоне со свойствами была получена хронологическая кривая его изменения (рис. 4.14). Данная кривая совпадает с обратной величиной хронологического изменения фильтрационного сопротивления, полученной по отношению действующего перепада напоров и величине перетекания из НВГ на каждый расчетный период (рис. 4.14).

Экспоненциальный рост среднего коэффициента фильтрации с 2005 по 2022 гг. выражен в увеличении его значений с $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут до 0,0015 м/сут, что на 3,5 порядка больше естественной величины. Фильтрационное сопротивление на данном временном интервале понизилось с 11,3 до 0,021 сут/м².

Образование незаложенных пустот при выемке полезного ископаемого приводит к оседанию рудной потолочины, её разуплотнению и увеличению проницаемости [98, 99]. Таким образом, согласно теоретическим предпосылкам функция изменения фильтрационного сопротивления ВЗТ определяется данными факторами (приращение объема пустот и оседания).

Диаграммы искомых корреляционных пар коэффициента фильтрации с деформациями рудной потолочины и дневной поверхности приведены на рисунке 4.15.

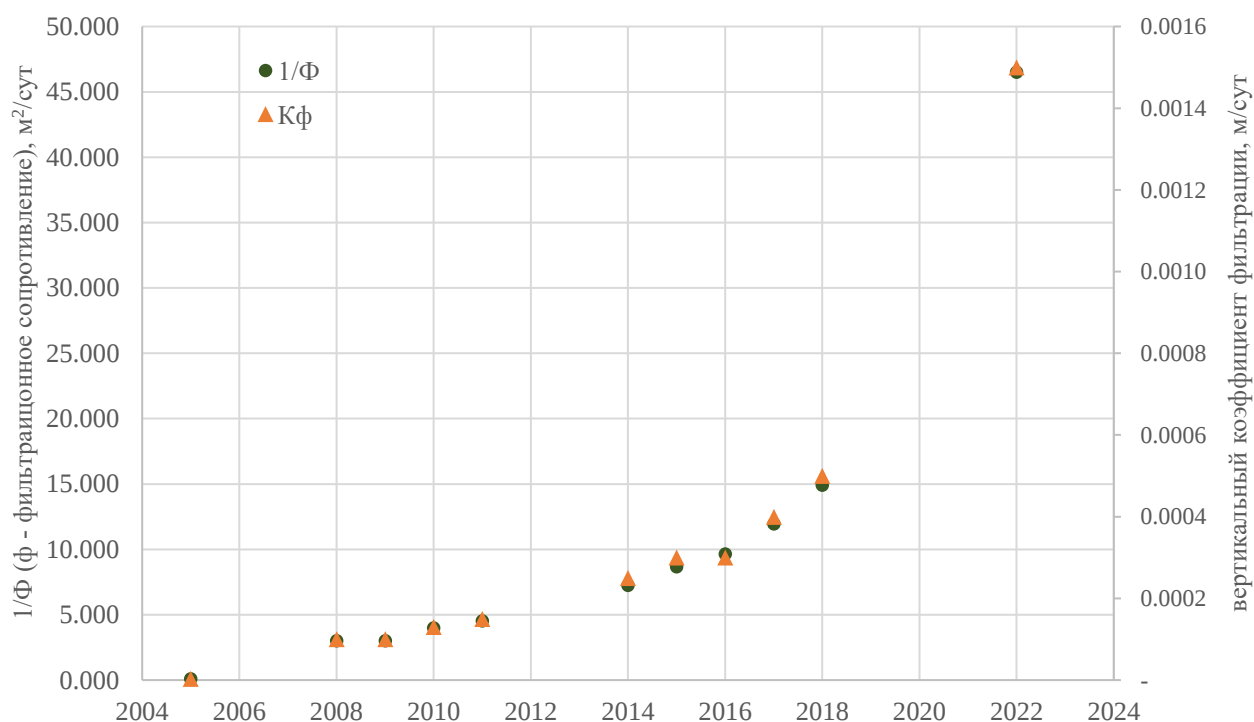


Рисунок 4.14 – Хронологический график изменения вертикального коэффициента фильтрации ВЗТ и $1/\Phi$, где Φ – эквивалентное фильтрационное сопротивление; по результатам калибровки модели с 2005 по 2022 г

Корреляционное поле сопоставления фильтрационного сопротивления и оседаний рудной потолочины приведено на рисунке 4.16.

Коэффициенты корреляции с максимальными оседаниями реперов наземной и подземной наблюдательных станций составили 0,95 и 0,99 соответственно, что указывает на сильную положительную связь. Величины относительной ошибки аппроксимации уравнений регрессии составили 7 % и 15 % для подземной и поверхностной наблюдательных станций соответственно.

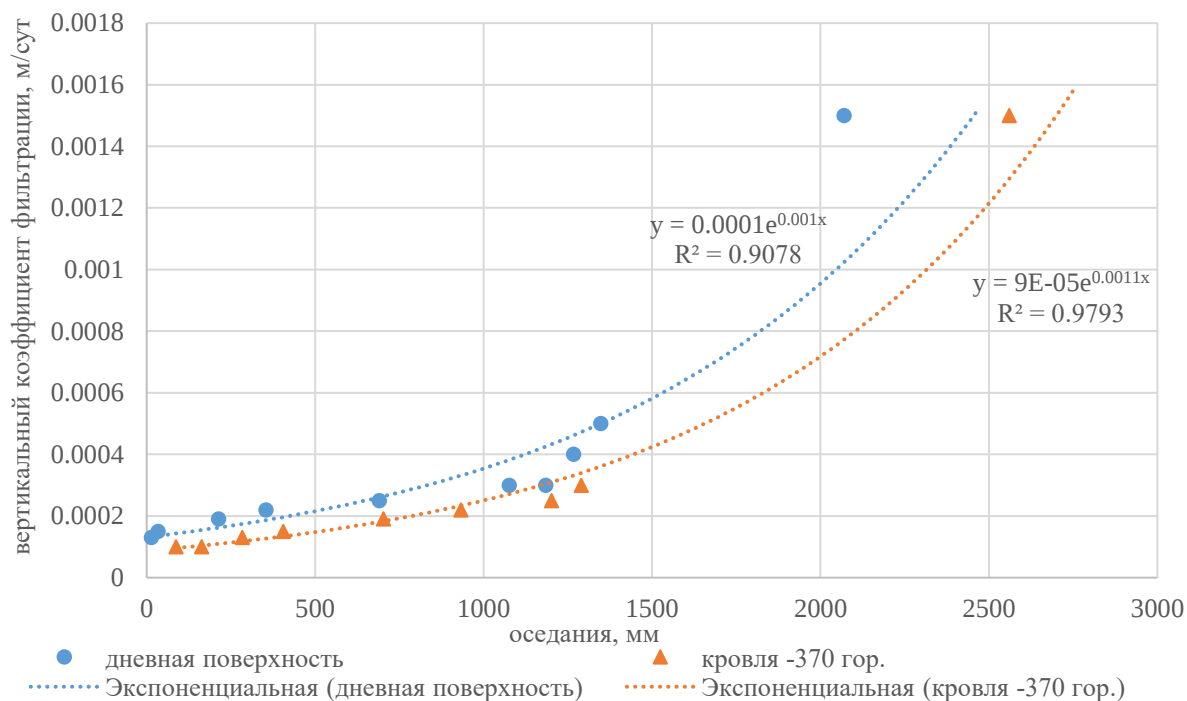


Рисунок 4.15 – Корреляционное поле сопоставления вертикального коэффициента фильтрации с максимальными оседаниями реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций

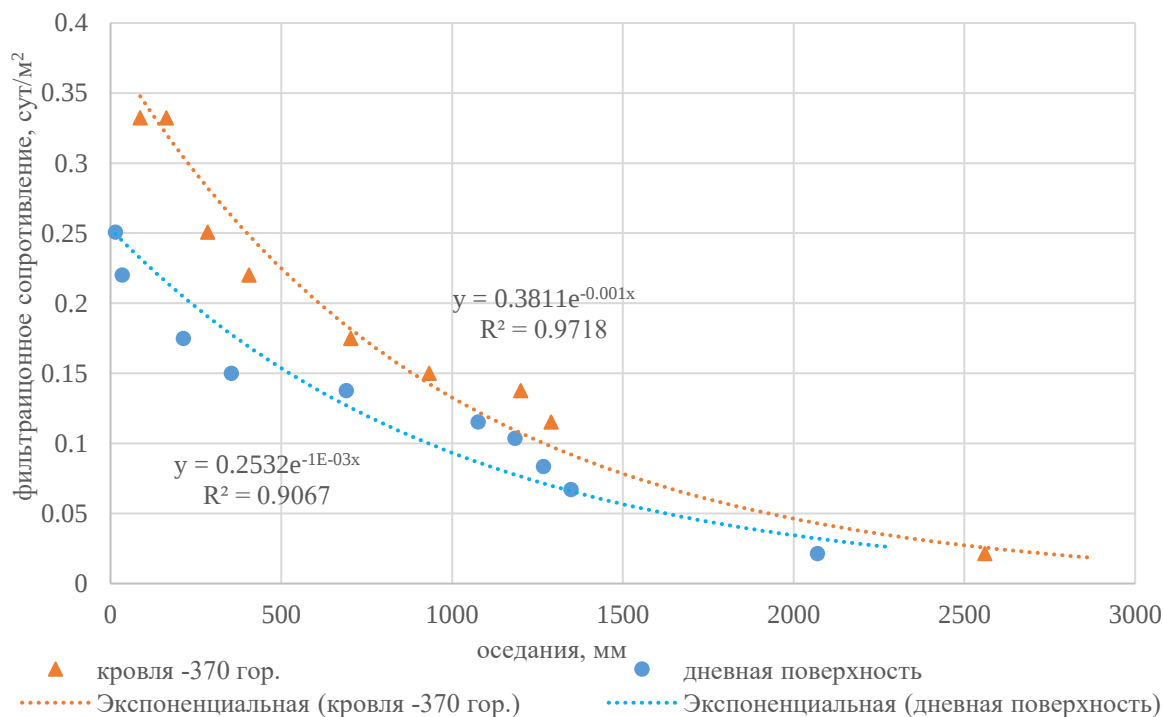


Рисунок 4.16 – Корреляционное поле сопоставления эквивалентного фильтрационного сопротивления с максимальными оседаниями реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций

К практическому использованию можно рекомендовать только зависимость фильтрационного сопротивления от оседания рудной потолочины (кровли -370 гор.) так как оседания дневной поверхности наследуют сжатие пород от дренажного эффекта и зависят от деформационных характеристик пород восьми вышележащих геологических подразделений осадочной толщи.

Сопоставление объема приращения незаложенных пустот с вертикальным фильтрационным сопротивлением, иллюстрирует, равно как и в случае с оседаниями рудной потолочины, уменьшение сопротивления по экспоненциальному закону (рис. 4.17). Коэффициент корреляции -0,96 характеризует связь данных показателей как тесную.

Неравномерность отработки и процедур закладки массива в плане и разрезе по-разному сказывается на интенсивности увеличения проницаемости ВЗТ. Ввиду отсутствия детальной информации по данному показателю однозначно обосновать увеличение проницаемости не представляется возможным. Однако, показатель приращения объема незаложенных пустот при прогнозировании вертикального коэффициента фильтрации и фильтрационного сопротивления водозащитной толщи требует дополнительного внимания в будущем, при условии уточнения озвученных факторов, и может использоваться как ориентировочный показатель при оценке водопритока.

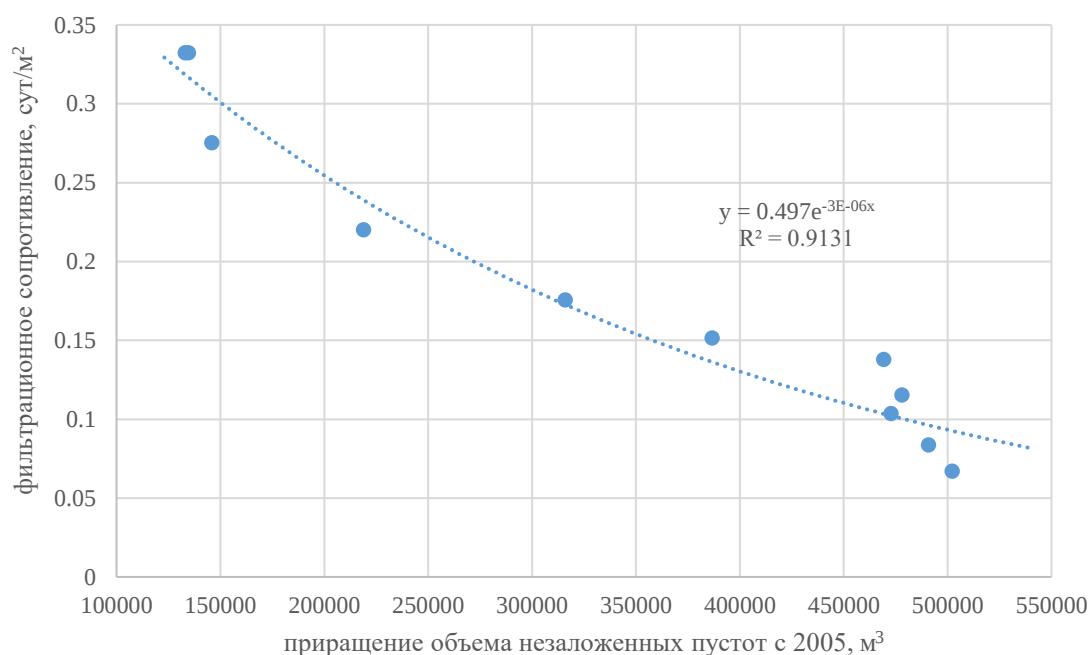


Рисунок 4.17 – Корреляционное поле сопоставления приращения объема незаложенных пустот относительно 2005 года с фильтрационным сопротивлением ВЗТ

В целом, статистически и теоретически обоснованной является установленная зависимость фильтрационного сопротивления ВЗТ от деформаций (оседаний) рудной потолочины (подшвы ВЗТ), которая характеризуется коэффициентом корреляции -0,99 и относительной ошибкой аппроксимации уравнения регрессии 7%. Данная зависимость, при

достоверном прогнозировании оседаний кровли 0-го слоя, может использоваться для оценки величины перетекания из НВГ в процессе отработки текущего участка.

Однако, если рассматривать прилегающие к первоочередному участку месторождения, то необходимо использовать не выявленную зависимость, а предложенный алгоритм получения значений фильтрационного сопротивления пород ВЗТ:

1. Значения функции изменения фильтрационного сопротивления в дискретном виде (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 математического моделирования определяется значение фильтрационного сопротивления, соответствующее выбранному диапазону деформаций (степени нарушенности подрабатываемого массива);

2. Для характера распределения максимальных деформаций в блоках очистного пространства характерно деление на несколько групп (рис. 4.18). В 9 и 10 блоках отрабатываются первые слои и деформации кровли 0-го слоя составляют до 500 мм. Блоки 7 и 8 можно отнести к группе с деформациями кровли 0-го слоя в диапазоне значений 500-1000 мм. Блоки 2, 3 и 4 имеют деформации кровли в диапазоне от 1000 до 1500 мм. Более интенсивная добыча ведётся в 1 и 6 блоках, где деформации кровли 0-го слоя находят в диапазоне 1500-2000 мм. Наибольшие деформации наблюдаются в 5 блоке, где отработано более 10 слоёв, соответственно, можно выделить отдельную группу с диапазоном оседаний 2000-2500 мм и более.

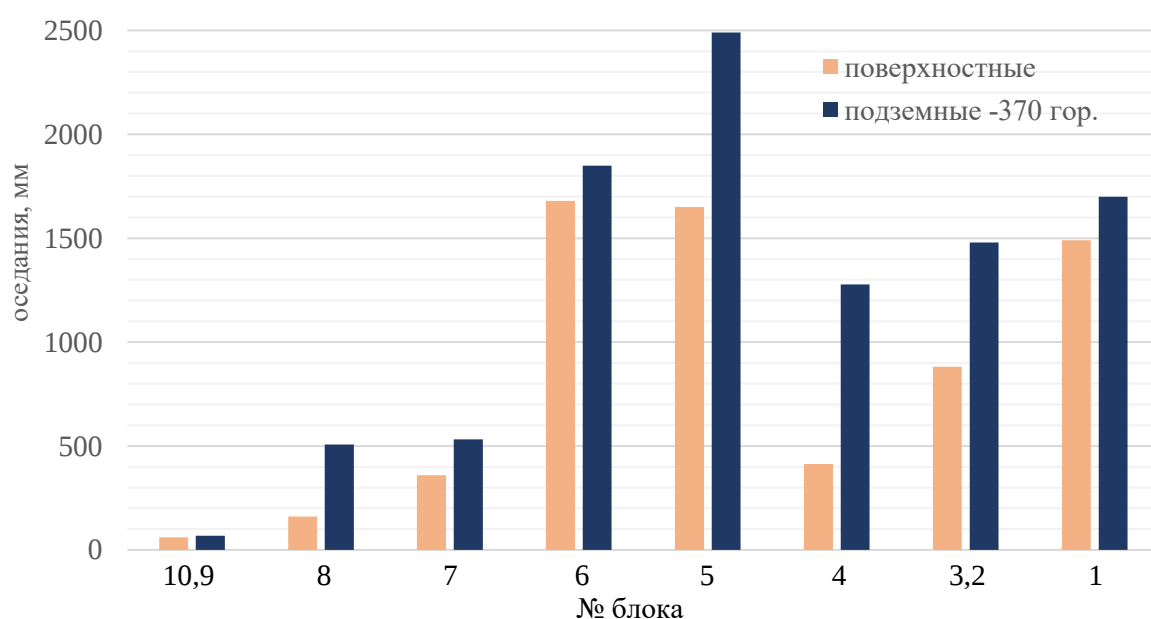


Рисунок 4.18 – Диаграмма распределения максимальных деформаций реперов подземной и поверхностной наблюдательных станций по блокам (2021 год)

Таким образом, в данном разделе предлагается алгоритм получения эквивалентного фильтрационного сопротивления пород ВЗТ, который может быть применен при прогнозе водопритока из НВГ в процессе отработки не только первоочередного, но и прилегающих участков. Для его реализации необходима дискретизация очистного пространства на водобалансовые зоны с замерами или расчетом напоров по блокам, в которых наблюдаются деформации выделенных групп.

Для первоочередного участка отработки при прогнозе водопритока в рудник можно использовать полученную эмпирическую зависимость оседаний кровли 0-го слоя от фильтрационного сопротивления пород ВЗТ, коэффициент корреляции которой $-0,99$, а относительная ошибка аппроксимации уравнения регрессии 7%

4.6 Обобщение результатов

В качестве основы прогнозирования водопритока к очистным выработкам были рассмотрены эмпирические зависимости, которые показали статистически значимый для использования в практических целях результат. Анализ групп горных, геомеханических и гидрогеологических факторов иллюстрирует существенное влияние каждого из них на водоприток к очистному пространству. Для удобства интерпретации результаты сведены в таблицу матрицы корреляции, демонстрирующую силу и направление связи между рассмотренными факторами (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Матрица коэффициентов корреляции между рассмотренными в IV главе факторами и водопритоком к очистным выработкам

Группа факторов	Фактор	Водоприток из НВГ	Водоприток из РВГ	Водоприток к II зоне
горные	Погонные метры проходки	0,89	-0,94	0,62
	Объем отбитой руды	0,83	-0,93	0,62
	Приращение объема пустот	0,96	-0,92	0,91
геомеханические	Оседания кровли -370 гор.	0,99	-0,98	0,93
	Оседания поверхности	0,97	-0,86	0,91
гидрогеологические	Понижение уровня в НВГ	0,91	-	0,99
	Понижение уровня в РВГ	-	-0,58	0,89
	Минерализация в главном водосборнике	-0,99	0,92	-0,92
	Концентрация хлорид иона в главном водосборнике	-0,98	0,87	-0,89

Совокупный анализ горных и геомеханических факторов однозначно указывает на увеличение водопритока из НВГ при увеличении показателей ежегодной проходки, приращения пустот и оседания вышележащего массива. При этом увеличению объема отбитой

горной массы в год и приращению объема пустот сопутствует рост водопритока по логарифмическому закону, а погонных метров проходки – по линейному. Рост оседаний рудной потолочины и дневной поверхности демонстрируют увеличение водопритока из НВГ по экспоненциальному закону с самыми высокими коэффициентами корреляции.

Суммарный водоприток к очистным выработкам статистически значимо связан с объемом приращения пустот и увеличивается по логарифмическому закону, в то время как рост оседаний рудной потолочины и дневной поверхности приводит к его экспоненциальному росту.

Водоприток из РВГ повсеместно имеет отрицательно направленную сильную связь с горными и геомеханическими факторами, однако, обусловлено это не техногенной нарушенностью массива, а интенсивным многолетним дренированием водоносного горизонта при сохранении контура дренажа и фильтрационных параметров горных пород фундамента. Несмотря на сильную отрицательную связь с горными и геомеханическими факторами, зависимости не могут использоваться для прогнозирования данной составляющей водопритока ввиду отсутствия теоретического обоснования данного процесса: пространственно подошва водозащитного целика находится выше сдренированного уровня подземных вод РВГ на 55 м.

Можно отметить, что рост суммарного водопритока к II балансовой зоне и водопритока к этой зоне из НВГ при сопоставлении с идентичными горными и геомеханическими факторами осуществляется по одинаковым законам, что указывает на ведущую роль НВГ в процессе формирования и динамике изменения водопритока к очистным выработкам. Данное обстоятельство обусловлено ростом водопритока из НВГ, превышающим фоновое снижение величины водопритока из РВГ, что обеспечивает увеличение суммарного к II зоне по аналогичному закону.

Более того, полученные зависимости подчеркивают ведущую роль техногенного фактора в лице групп горных и геомеханических показателей ведения горных работ в увеличении водопритока к очистным выработкам из НВГ и, как следствие, общего водопритока к очистному пространству.

Перспектива использования геомеханических параметров ведения очистных работ для прогнозирования водопритока к II балансовой зоне подчеркивает важность развития системы геомеханического мониторинга, повышения преемственности, количества точек и периодичности измерений.

В сущности, факторы гидрогеологической группы являются следствием дренажного эффекта рудника, однако, могут использоваться для оперативной оценки схемы формирования и величины водопритока к очистным выработкам. При этом эффективность такого метода сложно переоценить. В условиях технического развития средств контроля за изменением уровней подземных вод и концентрацией макрокомпонентов с точностью до 1 мм и 5% от

полученного содержания в воде, становится реальным высокочастотное наблюдение за предложенными показателями [108]. Это позволит в кратчайшие сроки реагировать на изменения гидрогеологических условий отработки месторождения.

Корреляционные пары водопритока из НВГ и общего водопритока к очистным выработкам с понижением в НВГ демонстрируют сильные положительные связи по линейному и логарифмическому законам с коэффициентами корреляции 0,91 и 0,99. Стоит отметить, что с ростом понижения в НВГ увеличивается и его доля в общем балансе формирования водопритока к II зоне.

Данный результат согласуется и с полученными ранее хронологическими графиками изменения доли водопритока из НВГ, приведёнными в III главе. Вероятно, полученная закономерность связана с относительно быстрым периодом наступления стационарного режима фильтрации в НВГ, что при техногенном увеличении фильтрации приводит к новой стабилизации уровня на более низких отметках. Последовательное увеличение проницаемости пород ВЗГ обеспечивает увеличение водопритока из НВГ и снижение в нем уровня подземных вод, связанных по выявленной зависимости.

Величина понижения уровня подземных вод в РВГ положительно коррелирует с суммарным водопритоком ко II зоне, однако, его рост не вызван увеличением притока из РВГ. Напротив, величина притока из РВГ снижается с ростом понижения и суммарного водопритока к II зоне, что свидетельствует о случайности данной зависимости.

Общая минерализация и концентрация хлорид иона в дренажных водах главного водосборника показывают идентичный вид связи с составляющими водопритока к II зоне из НВГ и РВГ: с их уменьшением в дренажных водах величина водопритока из НВГ характеризуется экспоненциальным ростом, а величина водопритока из РВГ снижается по линейному закону. Говоря об общем водопритоке к очистным выработкам, следует отметить, что его величина испытывает логарифмический рост при снижении минерализации и концентрации хлорид иона в дренажных водах главного водосборника. Исходя из сведений о химическом составе водоносных горизонтов нижнего комплекса такой результат является теоретически ожидаемым.

Не смотря на сильные корреляционные связи между факторами в предложенных эмпирических зависимостях рекомендуется учитывать среднюю ошибку аппроксимации, которая характеризует среднее отклонение расчетных значений по регрессионным моделям от фактических. Введение средней ошибки аппроксимации позволит определить ожидаемый диапазон разброса прогнозируемых величин (точность оценки).

Рассчитанная величина средней ошибки аппроксимации для всех рассмотренных зависимостей водопритоков приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Средняя относительная (в процентах) ошибка аппроксимации выбранных для прогнозных целей зависимостей

Группа факторов	Фактор	Водоприток из НВГ	Водоприток из РВГ	Водоприток к II зоне
горные	Погонные метры проходки	25	теоретически не обоснована	статистически не удовлетв.
	Объем отбитой руды	27,5	теоретически не обоснована	статистически не удовлетв.
	Приращение объема пустот	10,4	теоретически не обоснована	4,8
геомеханические	Оседания кровли -370 гор.	5,1	теоретически не обоснована	6,7
	Оседания поверхности	6,8	теоретически не обоснована	5,7
гидрогеологические	Понижение уровня в НВГ	16,8	-	1,4
	Понижение уровня в РВГ	-	статистически не удовлетв.	6,2
	Минерализация в главном водосборнике	9,2	16,2	5,8
	Концентрация хлорид иона в главном водосборнике	10,7	12,2	6,4

4.7 Выводы по IV Главе

Величина водопритока к очистному пространству является удобной конечной искомой, поскольку содержит в себе влияние геолого-гидрогеологических, горных и геомеханических факторов. Поэтому непосредственный прогноз её значений на основе эмпирических уравнений регрессии с учетом накопленного опыта разработки, а не значений параметров её расчета по теоретическим зависимостям, является оптимальным выбором для первоочередного участка отработки Яковлевского месторождения. В сущности, в основе данного подхода лежит гидравлический метод, применяемый при оценке запасов подземных вод, за тем исключением, что для прогноза водопритока используются не только понижения, но и ряд других предложенных параметров (факторов).

Исходя из рассчитанных значений коэффициентов корреляции и средней ошибки аппроксимации, а также теоретического обоснования зависимостей выбранных факторов от водопритока к очистному пространству можно заключить, что наиболее подходящими для прогноза водопритока являются все гидрогеологические и геомеханические, при этом лучший

результат показывают минерализация и концентрация хлорид иона в главном водосборнике, а также оседания рудной потолочины в кровле -370 гор.

Из горных факторов наиболее подходящим является расчетный показатель накопительного приращения пустот в руднике, который подходит для прогнозирования общего водопритока к очистным выработкам и величины водопритока из НВГ. Проектное значение данного показателя позволит оценить ожидаемую величину водопритока в очистное пространство, что позволит заблаговременно принять меры по управлению техногенным режимом подземных вод.

Регрессионные модели, содержащие в основе погонные метры проходки и объем отбитой руды в год обладают низкими коэффициентами корреляции (для общего водопритока к II зоне), теоретически не обоснованы (для оценки водопритока из РВГ) или характеризуются высокой ошибкой аппроксимации в 25-28 % (для оценки водопритока из НВГ). Учитывая сильную корреляцию, более представительный ряд наблюдений для данного фактора возможно позволит в будущем выявить удовлетворяющую для прогноза зависимость.

Самый высокий результат демонстрируют регрессии, основанные на корреляции оседаний рудной потолочины -370 гор. Они обладают наивысшими коэффициентами корреляции и низкими ошибками аппроксимации. Однако, непредставительные ряды оседаний, ввиду низкой прецизионности измерений деформаций подошвы водозащитного целика понижают качество результата, но повышают актуальность и потенциал совместного гидрогеомеханического мониторинга массива.

Теоретически и статистически обоснованными зависимостями, подходящими для оценки водопритока из РВГ к II балансовой зоне, являются лишь те, что основаны на показателях минерализации и концентрации хлорид иона в главном водосборнике. В целом, учитывая многолетний спад уровней в РВГ, уменьшение доли и абсолютного значения водопритока из горизонта, в будущем ожидается сохранение данной тенденции при условии сохранения контура горных работ (контура дренажа на первоочередном участке отработки).

Стоит отметить, что совместное использование гидрогеологических факторов с горными и геомеханическими позволит повысить достоверность прогнозирования и эффективность управления водопритоками на Яковлевском руднике (первоочередном участке).

Если рассматривать более универсальные параметры для прогнозирования водопритока на прилегающих участках, основанные на предпосылках теории фильтрации, то установлено, что в данных условиях целесообразно использовать параметр эквивалентного фильтрационного сопротивления, получаемый по предложенному в разделе 4.5 алгоритму, основанному на тесной связи деформаций кровли 0-го слоя и росте техногенной проницаемости пород ВЗТ.

Обобщая результаты, полученные в IV главе, можно сформулировать второе защищаемое положение: *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.*

ГЛАВА V СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

5.1 Особенности постановки гидрогеологического мониторинга в условиях Яковлевского месторождения

Федеральными законами и нормативными документами в области разработки месторождений твердых полезных ископаемых предусмотрено в обязательном порядке создание специальных локальных регламентов ведения гидрогеологического мониторинга. Несмотря на то, что действующей нормативной документацией не контролируются конкретные методики ведения гидрогеологического мониторинга и периодичности измерений, к недропользователю предъявляется ряд конкретных требований, среди которых можно выделить [109, 110]:

- регулярность наблюдений за показателями и элементами геологической среды, находящимися в зоне существенного влияния горного объекта;
- создание и ведение регистрационных баз данных фиксируемых показателей;
- информативность собираемых в рамках мониторинга данных;
- анализ и интерпретация результатов наблюдений, сопоставление с показателями геологической среды периферийной зоны влияния горного объекта;
- передачу государственным органам сведений о состоянии геологической среды.

Стоит отдельно отметить, что информативность, получаемого в рамках мониторинга объема данных о гидрогеологических показателях среды, должна обеспечивать возможность проведения их качественного и количественного анализа, предупреждения вероятных негативных изменений состояния среды, разработки рекомендаций по ликвидации аварийных случаев и прогнозирования изменения состояния среды в том числе при осуществлении дренажных мероприятий на горном объекте.

Таким образом, положения гидрогеологического мониторинга, лежащие в основе регламента его ведения на конкретном месторождении, должны способствовать эффективной и безопасной добыче полезного ископаемого, предупреждению возникновения аварийных случаев, прогнозированию изменений гидрогеологических условий месторождения и сокращению влияния горного объекта на экологию окружающей среды [56, 111].

Как правило, система мониторинга на конкретном месторождении разрабатывается согласно документам, содержащим рекомендации и методики ведения гидрогеологического мониторинга на месторождениях твердых полезных ископаемых. Лишь небольшая доля из них учитывает специфику ведения горных работ под неосушенными водными объектами и изменчивость водопроницаемости подрабатываемого массива [112, 113]. Более того, основная часть таких указаний разработана для угольных месторождений, на которых практикуется

подход к трещинному характеру увеличения проницаемости вышележащих пород, что не подходит для инженерно-геологических условий Яковлевского месторождения [114-119].

Положения ведения мониторинга на Яковлевском месторождении должны удовлетворять не только требованиям, предъявляемым нормативными документами к месторождениям твердых полезных ископаемых, но и учитывать особенности природных и техногенных условий ведения горных работ на данном руднике.

К особенностям Яковлевского месторождения при постановке гидрогеологического мониторинга можно отнести:

- наличие высоконапорных водоносных горизонтов нижнего комплекса, формирующих водоприток к горным выработкам;
- изменяющаяся во времени схема формирования водопритока к очистным выработкам;
- технология отработки месторождения с закладкой выработанного пространства при сохранении контура технологического этажа (очистного пространства);
- наличие в кровле 0-го слоя водозащитного целика, сложенного в нижней половине разреза рыхлыми, тонкопористыми алевроитами и пылеватыми песками (реже слабосцементированными песчаниками), проницаемость которых в зоне сдвижения вышележащего массива увеличивается во времени не по трещинному типу;
- резкое различие концентраций хлорид иона и общей минерализации нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов.

В трудах Мироненко В.А. и Норватова Ю.А. касательно постановки гидрогеологического мониторинга на месторождениях полезных ископаемых можно встретить тезис о необходимости его постоянного развития [15, 56, 104]. Сущность идеи заключается в адаптации системы мониторинга к изменяющимся гидрогеологическим условиям при добыче полезного ископаемого.

Выявленные при анализе и интерпретации собранных в рамках мониторинга данных зависимости и особенности изменения гидрогеологических условий должны обозначать вектор дальнейшего развития всей системы и служить для постоянной корректировки ранее сформированных представлений о гидрогеологической структуре месторождения. Следуя данному тезису, в условиях Яковлевского месторождения можно обеспечить рост достоверности прогнозов водопритоков к очистному пространству путем внедрения в практику мониторинга полученных автором результатов.

5.2 Требования к показателям ведения мониторинга на Яковлевском месторождении

Учитывая специфику отработки Яковлевского месторождения одной из наиболее важных задач при гидрогеологическом обеспечении ведения горных работ является оценка

схемы формирования и прогноз водопритока к горным выработкам, что позволит проектировать оптимальную систему дренажа и водоотведения, повысить стабильность добычи богатых железных руд. В сущности, изменение величины водопритока при сохранении контура ведения горных работ является следствием техногенного увеличения проницаемости, поэтому одной из основных направленностей мониторинга является уточнение проницаемости водозащитной толщи.

Такая постановка задачи обуславливает выбор определённого набора целевых показателей, регулярный сбор и интерпретация которых в рамках мониторинга на месторождении могли бы сформировать пополняющуюся базу данных и оценивать ожидаемый водоприток.

Из полученных результатов III и IV глав к таким целевым параметрам при ведении мониторинга целесообразно отнести все показатели из группы гидрогеологических и геомеханических факторов, а также показатель приращения незаложенных пустот. Они демонстрируют тесную корреляцию и удовлетворительную ошибку аппроксимации относительно полученных уравнений регрессии при сопоставлении с водопритоком к очистным выработкам, согласуются с теорией фильтрации подземных вод и легкодоступны к натурным определениям. Принимая во внимание доступность современной измерительной аппаратуры, практически все данные о предложенных показателях могут собираться в автоматическом режиме. Расчет же приращения пустот может осуществляться путем вычислений из проектируемых объемов проходки и закладки выработанного пространства.

Мониторинг в данном случае будет осуществлять и верификационную функцию в отношении полученных прогнозных зависимостей. Критериями применимости выявленных зависимостей при отработке месторождения могут выступать интервалы величин водопритоков, полученные по уравнениям регрессии с учетом разброса эмпирических значений по средней относительной ошибке аппроксимации. Таким образом, можно обозначить диапазон ожидаемых значений водопритоков, основанный на эмпирических данных в более ранний безаварийный период.

Фиксируемые в рамках мониторинга значения, выбивающиеся из установленных интервалов по ошибкам аппроксимации, будут являться индикаторами изменения существующего тренда развития гидрогеологической ситуации. Наступление данного сценария развития послужит сигналом к пересмотру полученных в рамках предыдущих глав зависимостей и будет требовать уточнения как перечня влияющих на водопритоки факторов, так и самих уравнений регрессии. Вместе с тем, резкие увеличения водопритоков от ожидаемых значений позволят выявить интенсификацию гидрогеомеханических процессов в кровле

выработок -370 гор. на ранних этапах их развития, назначить дополнительные измерения и провести соответствующие меры реагирования.

5.3 Обоснование периодичности измерений показателей гидрогеологической группы

В рамках существующего мониторинга на Яковлевском месторождении осуществляется ежемесячное измерение уровней подземных вод в скважинах наблюдательной сети. Как отмечалось ранее, наибольшей чувствительностью к работе дренажной системы рудника обладают водоносные горизонты нижнего комплекса, в то время как колебания уровней подземных вод в горизонтах верхнего комплекса реагируют на изменения дренажа с отставанием в 3-6 месяцев. Такую зависимость позволили выявить технические работы по отключению на обслуживание ряда высокодебитных дренажных скважин в периоды 2011-2014 гг. и 2019-2020 гг. (раздел 2.1.4).

В связи с такой задержкой отклика водоносных горизонтов верхнего комплекса наибольшей необходимостью обоснования периодичности измерений обладают нижнекаменноугольный и руднокристаллический водоносные горизонты. Как и в случае оценки водопритоков, данные о понижениях за 2011-2014 гг. и 2019-2020 гг. не будут участвовать в разработке положений мониторинга.

Среди наблюдательных скважин НВГ существует две группы с резко отличающимся режимом: скважины лежачего бока (32 кр, 7 кр и 267 Г) расположены в зоне с низкой проницаемостью, понижения в которой не превышают 70 м., скважины 640, 638, 28 кр и 26 кр располагаются в непосредственной близости от очистных выработок в зоне повышенной проницаемости НВГ, характеризуются понижениями до 145 м и более крутыми уклонами хронологических трендов снижения уровней. Поскольку скважины внутри каждой группы демонстрируют схожесть в поведении уровней, для обоснования периодичности измерений были отобраны по одной: из лежачего бока 7 кр, из группы над очистным пространством – 28 кр (рисунок 2.18).

Уровни подземных вод в скважинах, оборудованных на руднокристаллический водоносный горизонт, демонстрируют равные уклоны во времени на разном удалении от рудника, что обусловлено сильной сдренированностью горизонта и низкой анизотропией фильтрационных свойств. В связи с этим для анализа была отобрана наблюдательная скважина 610 с наиболее регулярными измерениями.

В основе критерия максимально допустимого периода измерений рассматривается применение соотношения между ошибкой измерения уровня прибором и приращению понижения, рассчитанного за многолетний период наблюдений.

В качестве эталонной функции изменения уровня в скважине 28 кр во времени было взято уравнение линейной регрессии, полученное по данным хронологического изменения уровней подземных вод в период с 2014 по 2022 гг. (рис. 5.1). Для скважины лежачего бока 7 кр уравнение регрессии за схожий период представлено на рис. 5.2.

Как и в предыдущих главах, критерием применимости уравнений регрессии в практических целях послужили модульные значения коэффициентов корреляции, превышающие значение 0,7. Средняя относительная ошибка аппроксимации функций составляет 16 % для скважины 28 кр, 2% для скважины 7 кр и 1% для 610.

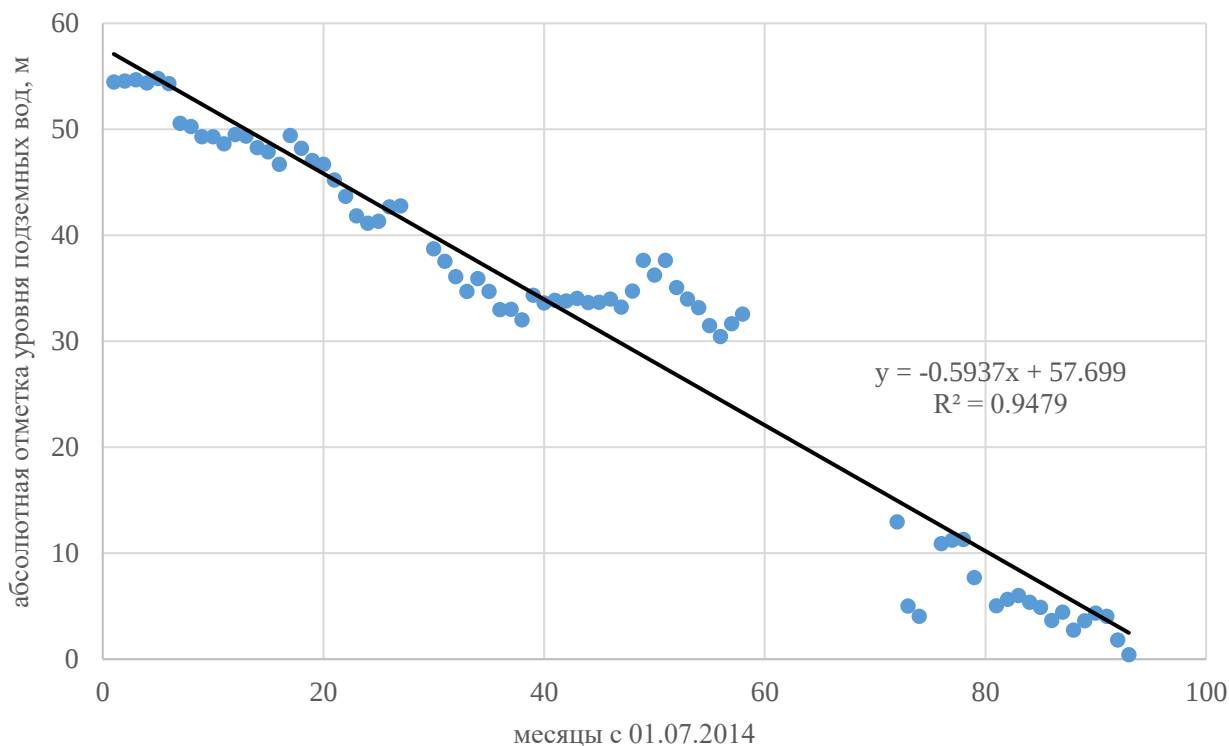


Рисунок 5.1 – Хронологический график изменения уровней в скважине 28 кр с линейным трендом в период 01.07.2014-01.03.2022 гг. (составлено автором)

Результаты наблюдений за уровнем подземных вод в выбранный период по скважине 610 и линейный тренд снижения уровней в ней представлен на рисунке 5.3. Как можно заметить, для удобства интерпретации данных и расчета средних приращений функции уровня подземных вод временная шкала представлена в виде рядов с месячным единичным периодом. Началом анализируемого временного интервала служат измерения в июле 2014 г., а концом – в марте 2023 г., что составляет в сумме 93 месяца.

Исходя из линейных уравнений регрессии, полученных по хронологическим графикам изменения уровней подземных вод в НВГ и РВГ были найдены теоретические максимальные и минимальные значения абсолютных отметок в рассматриваемых скважинах, что позволило оценить среднемесечное приращение уровня подземных вод. Результаты представлены в таблице 5.1.

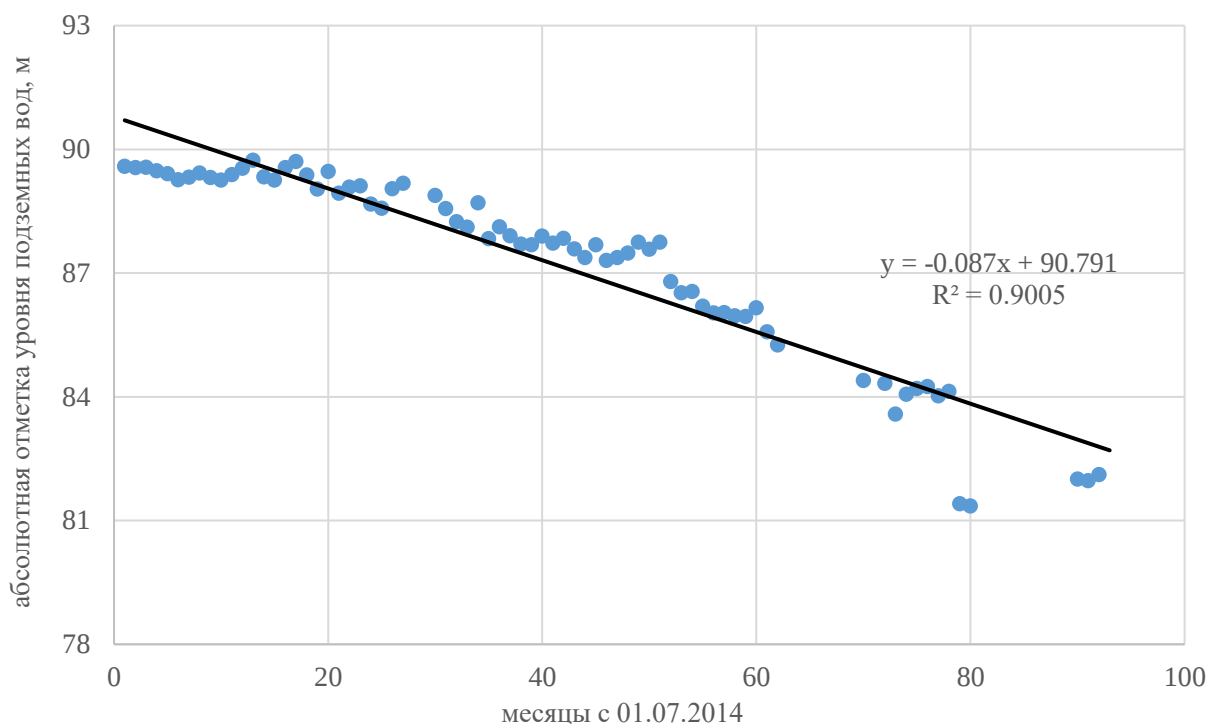


Рисунок 5.2 – Хронологический график изменения уровней в скважине 7 кр с линейным трендом в период 01.07.2014-01.03.2022 гг. (составлено автором)

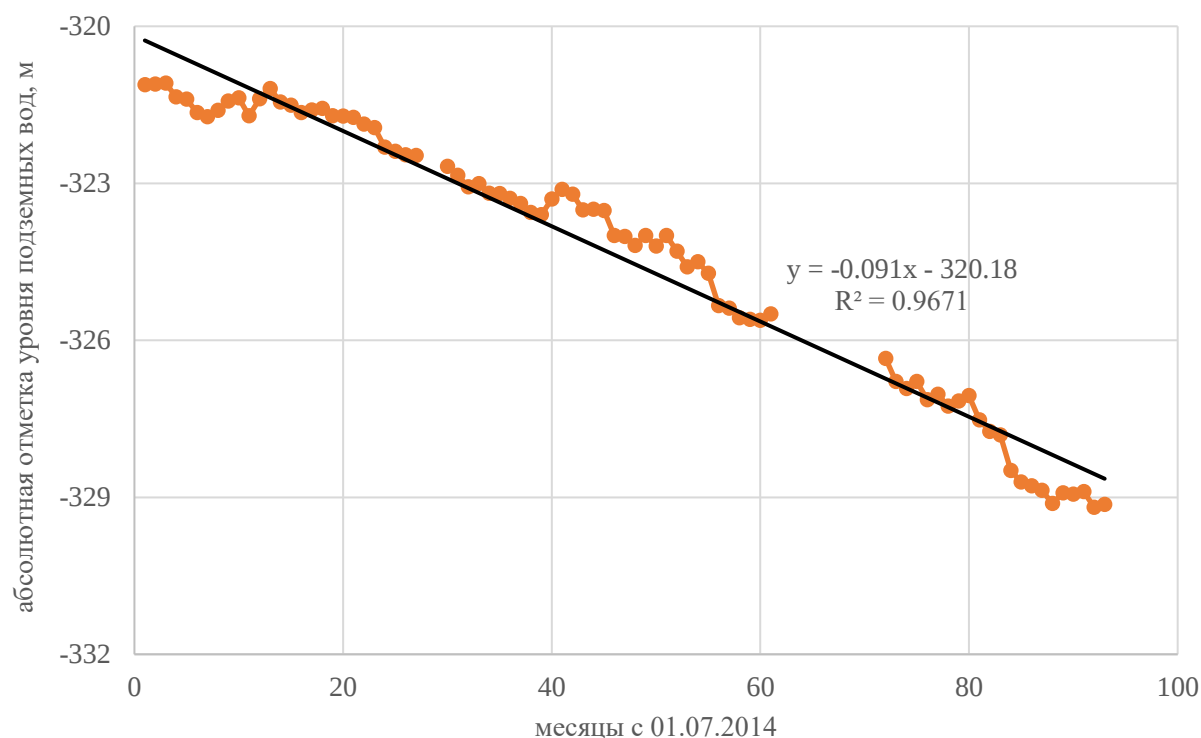


Рисунок 5.3 – Хронологический график изменения уровней в скважине 610 с линейным трендом в период 01.07.2014-01.03.2022 гг. (составлено автором)

Принимая во внимание постоянно изменяющиеся гидрогеологические условия отработки Яковлевского месторождения, целесообразно рекомендовать максимально допустимый период измерения уровней, который контролировался бы ошибкой измерительной аппаратуры.

Таблица 5.1 – Расчетные значения среднемесячных изменений уровней подземных вод, максимальных и минимальных напоров в НВГ и РВГ за период 2014-2022 гг.

параметр	скв. 28 кр (НВГ)	скв. 7 кр (НВГ)	скв 610 (РВГ)
Н макс, м	57,11	90,7	-320,3
Н мин, м	2,49	82,79	-328,6
ΔH , см/мес	59	8,6	8,9

Для большинства электроуровнемеров, хлопущек и датчиков давления, устанавливаемых в самописцах для давлений ~ 100 м водного столба, величина погрешности измерений составляет 1 см. Таким образом, основываясь на выявленных скоростях изменения напоров и характерной ошибке измерений, можно рекомендовать фиксацию уровней подземных вод с периодичностью в 3-4 дня для скважин лежачего бока НВГ и всего РВГ.

Рекомендованным значением периодичности измерений для группы скважин НВГ, располагающихся в висячем боку и над очистными выработками, будет два раза в сутки. В будущем, при выполаживании хронологических трендов и стабилизации изменения уровней целесообразно уменьшить частоту измерений до рекомендуемых значений в специальной гидрогеологической литературе. В переходный этап можно использовать данный метод для корректировки периодичности измерений.

Учитывая сложность и особенности изменения горно-геологических условий разработки месторождения, которые обуславливают высокие требования к информативности фиксируемых данных, такой подход к измерению уровней можно считать оптимальным.

Ранее было доказано, что показатели минерализации и концентрации хлорид иона в главном водосборнике позволяют получить достоверные характеристики водопритока к очистным выработкам.

Если применить данный метод к этим показателям, то исходя из уравнений регрессии рассчитанные величины среднегодовых изменений минерализации и концентрации хлорид иона составят 0,07 и 0,044 г/дм³ соответственно (рис. 5.4 и 5.5, табл. 5.2). Сами уравнения регрессии статистически удовлетворяют требованиям для использования, ошибки их аппроксимации не более 5%, модули коэффициентов корреляции превышают 0,96.

Таблица 5.2 – Расчетные значения среднегодовых изменений минерализации и хлорид иона в главном водосборнике в период 2005-2022 гг.

Концентрации	Общая минерализация	Хлорид ион
максимум (2005), г/дм ³	2,94	1,7
минимум (2022), г/дм ³	1,5	0,8
среднегодовое изменение, г/дм ³	0,07	0,044

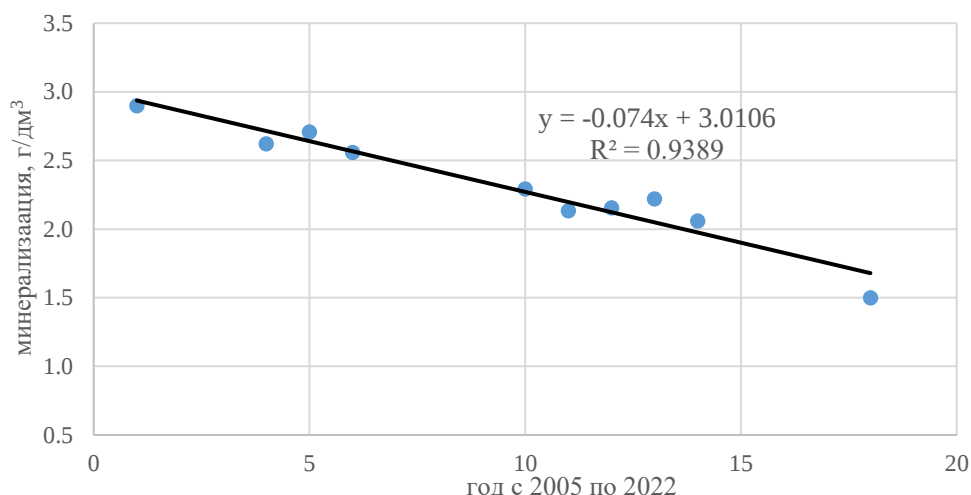


Рисунок 5.4 – Хронологический график изменения минерализации в главном водосборнике с линейным трендом в период 2005-2022 гг. (составлено автором)

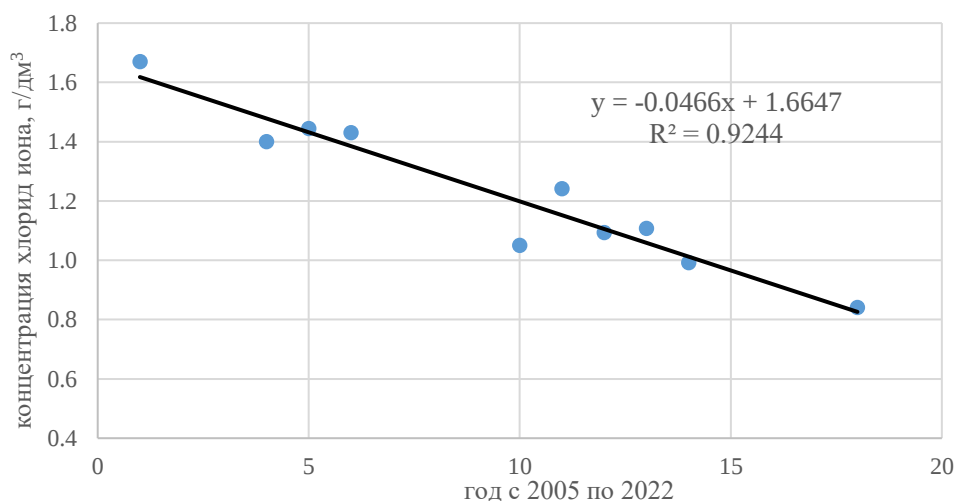


Рисунок 5.5 – Хронологический график изменения концентрации хлорид иона в главном водосборнике с линейным трендом в период 2005-2022 гг. (составлено автором)

Согласно протоколам результатов измерения проб воды, из аккредитованной лаборатории, сотрудничающей с Яковлевским месторождением, погрешности измерений сухого остатка и хлорид иона составляют 8 и 10 % соответственно. Исходя из тенденций изменения концентраций рассматриваемых компонентов в главном водосборнике, ожидается, что их значения не будут превышать значение 2022 г. Это позволяет выявить максимально ожидаемую ошибку измерений. Для минерализации и хлорид иона в предстоящие периоды она не будет превышать 0,13 г/дм³ и 0,08 г/дм³. В связи с этим, достоверно судить об изменении гидрохимических условий в руднике в рамках текущей тенденции можно только по замерам за двухлетний период. В таком случае, можно рекомендовать использование более точного оборудования для анализов с сохранением периодичности измерений согласно действующему регламенту.

5.4 Рекомендации по фиксации водопритоков к очистным выработкам

Деформирование горных пород в зоне сдвижения вышележащего массива приводит к высокой аварийности наблюдательных скважин над очистным пространством, разрушению интервалов цементации и сплошности обсадных колонн. Сооружение восстающих наблюдательных скважин непосредственно из выработок -370 гор сопряжено с рисками прорыва подземных вод из НВГ. В данных условиях, сооружение густой сети наблюдательных скважин на НВГ над очистными выработками средней глубиной 520 м представляется нерентабельным несмотря на её потенциал к локализации участков интенсификации процесса перетекания по результатам наблюдений за уровнями. Скважины в зоне лежащего бока НВГ не чувствительны к водопритоку в выработки, а в хоне висячего бока не позволят с достаточной скоростью реагировать на изменение уровней над очистным пространством.

В связи с этим, предлагается альтернативный способ повышения эффективности гидрогеологического мониторинга путем дискретизации балансовых зон формирования водопритока в очистном пространстве по технологическим блокам. Способ требует замер водопритоков на ключевых участках сбора дренажных вод каждого блока. Таковыми могут являться съезды с -370 гор. на -425 гор., где в настоящее время и производится сброс дренажных вод для дальнейшего отведения к порожняковому квершлагу и главному водосборнику.

Из требований к оборудованию участков можно выделить:

- доступ в течение всего периода наблюдений;
- защищенность от ведения горных работ;
- расположение на конечном участке водосбора всей балансовой единицы (блока).

Автоматизированные расходомеры могут существенно упростить сбор данных о водопритоках к выделенным балансовым зонам и повысить скорость реагирования на изменения расхода дренажных вод в канавках. Как и в случае с фиксацией уровней подземных вод в наблюдательных скважинах, критериями реагирования могут служить отклонения от существующих трендов изменения водопритоков с учетом статистической обработки формируемой базы данных.

В III главе было выявлено преимущество объемно-весового метода для оценки составляющих в общем балансе формирования водопритока. Более того, расчетные величины были верифицированы с помощью реальных замеров минерализации в 2022 г. и показали схожий результат. Реализация данного метода для каждой из балансовых единиц (блоков) существенно повысит информативность гидрогеологического мониторинга. Для этого

целесообразно оборудовать каждый из пунктов замеров расходов датчиками фиксации минерализации (электропроводности).

Чувствительность данного метода косвенно может подтверждаться полевыми замерами в рамках гидрогеологической съемки рудника автором минерализации рудничных вод в дренажных канавках на -425 гор. При движении с северо-запада на юго-восток вдоль штрека лежащего бока на -425 гор. было произведено 12 замеров минерализации дренажных вод до сброса вод с -370 гор. по наклонным съездам в 8, 7, 6, 5, 4 и 2-3 блоков и на удалении 10-15 метров от точки сброса ниже по течению вод в канавке (таблица 5.3). Можно заметить, что минерализация вод в дренажной канавке штрека до и после сброса с -370 гор. претерпевает заметные изменения. Если до сброса минерализация повышается, стремясь к фоновой в РВГ, то сброс вод с вышележащих горизонтов несёт преимущественно воды НВГ, тем самым понижая её значения до $<1 \text{ г/дм}^3$.

Таблица 5.3 – Точки замера минерализации рудничных вод в дренажной канавке штрека лежащего 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		4-й блок	
	До сброса	После сброса	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	0,75	0,47

Исходя из получаемых в рамках такого адаптивного гидрогеологического мониторинга объемов дренажных вод, их минерализации и сведений о среднем химическом составе НВГ и РВГ можно с высокой достоверностью прогнозировать изменение как схемы формирования водопритоков в каждом из блоков, так и оперативно локализовать места потенциальных прорывов подземных вод. Вместе с тем, дискретизированный сбор сведения о распределении водопритока к очистным выработкам позволит оптимизировать дренажную систему рудника.

Критерии периодичности наблюдений за водопритоками по предложенной методике также могут быть обоснованы с помощью ошибок измерений по аналогии с понижениями и минерализациями (раздел 5.3), однако, для этого потребуется представительный ряд измерений.

В разделе 4.5 был предложен алгоритм получения эквивалентного фильтрационного сопротивления для оценки и прогнозирования водопритока к очистному пространству на основе развития деформаций кровли 0-го слоя. Реализация данного подхода с целью повышения достоверности прогнозирования водопритока на первоочередном и прилегающих участках отработки также требует замера водопритоков в блоках с разными величинами деформаций рудной потолочины.

Таким образом, предложенная методика мониторинга не требует дорогостоящего бурения сети наблюдательных скважин с поверхности и их обновления после выхода из строя при деформировании массива, позволяет детальнее уточнять схему формирования водопритока к всему очистному пространству и каждому блоку в отдельности, локализует участки прорывов или резкого увеличения доли перетекания из НВГ, позволяет определять фильтрационное сопротивление пород ВЗТ для дальнейших прогнозов водопритока, а также, учитывая современное состояние технологий, может быть автоматизирована и предоставлять данные дежурному диспетчеру в реальном времени.

5.5 Прямые методы определения проницаемости водозащитной толщи

Проектом разработки Яковлевского месторождения предусмотрено проведение специальных гидрогеомеханических исследований в теле водозащитной толщи, включающих в себя [96]:

- строительство буровых камер;
- бурение восстающих скважин;
- проведение пневмоиспытаний ВЗТ.

Отечественный опыт проведения пневмоиспытаний при отработке подкарьерных запасов на алмазных месторождениях западной Якутии показал эффективность в получении информации о фильтрационных параметрах предохранительных целиков трубок «Мир», «Интернациональная», «Айхал», «Удачная» [17, 120]. Плюсами данных работ являются также быстрое наступление стационарного (квазистационарного) режима фильтрации воздуха, что значительно сокращает длительность проведения работ, и щадящее относительно воды воздействие на породы при фильтрации, что качественно лучше сохраняет сложение горных пород.

Несмотря на эффективность данного метода опробований, дополнительная техногенная нагрузка в виде бурения восстающих скважин может приводить к ослаблению водозащитной функции целика. В связи с этим ещё одним преимуществом предложенного способа мониторинга путем дискретизации очистного пространства на водобалансовые зоны будет локализация наиболее приоритетных участков для проведения специальных гидрогеологических исследований в кровле 0-го слоя, что позволит оптимизировать объемы бурения и снизить техногенную нагрузку на водозащитный целик.

При сооружении восстающих скважин для проведения пневмоиспытаний необходимо представление о высоте распространения зоны ненасыщенной фильтрации, а также обоснование безопасных параметров их проходки.

Определение положения границы зон насыщенной и ненасыщенной фильтрации в теле ВЗТ было осуществлено на разработанной автором геофильтрационной модели. Согласно полученным результатам, водонасыщенная зона распространяется под подошву НВГ в центральной части очистного пространства на 2-3 м, а на участках приближения к северной и южной границам рудной полосы на 15 м (рис. 5.6).

Данные значения являются ориентирами, контролирующими параметр глубины опытных скважин для проведения специальных гидрогеомеханических исследований (пневмоиспытаний). Однако, безопасность их проходки с точки зрения прорывоопасности требует дополнительного обоснования.

Расчет произведён по формуле В.А. Мироненко – В.М. Шестакова, которая хорошо реализуется в условиях, когда ширина одиночной выработки сопоставима или значительно меньше мощности целика, что во многом отвечает рассматриваемому случаю проведения опытов. Механика расчета основана на предположении о том, что деформации разрушения целика развиваются по типу поперечного сдвига (формула 1.2.2):

$$H_{\text{пр}} = \frac{m}{\gamma_{\text{в}}} \left(\gamma_{\text{г.п.}} + \frac{2c}{b - tg\phi * m\zeta} \right)$$

где: m – мощность целика, м; $\gamma_{\text{г.п.и в}}$ – удельный вес горной породы и воды соответственно Н/м³; c и ϕ – параметры прочности целика, Па и градусы соответственно; ζ – коэффициент бокового давления в толще пород; b – ширина одиночной выработки, м.

Очевидно, что в ходе расчета следует ориентироваться на неблагоприятные условия бурения – в вторично обводнённых железных рудах, когда угол трения БЖР снижается с 23° до 8°, а сцепление соответствует средней величине в 25000 Па. В данном состоянии руды имеют удельный вес около 30 000 Н/м³ при коэффициенте бокового давления $\zeta = 0,67$ [46, 72, 73]. График изменения предельных напоров над забоем восстающих скважин в зависимости от их диаметра и остаточной мощности целика (m) представлен на рисунке 5.7.

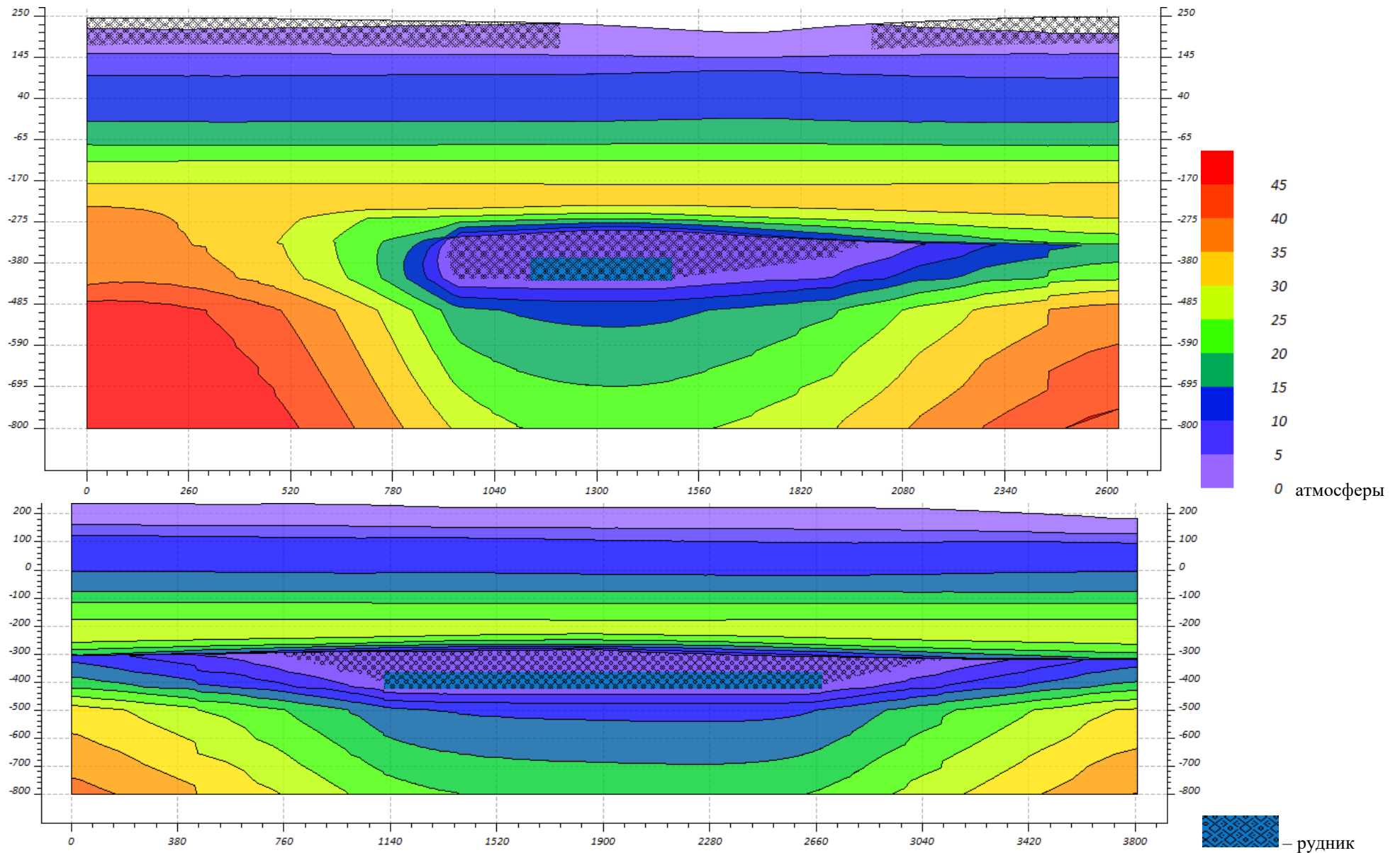


Рисунок 5.6 – Распределение давления в теле водозащитной толщи на разрезе: верхний рисунок – вкрест простирания ЮЗ-СВ; нижний рисунок – по простиранию рудного тела СЗ-ЮВ. Штриховкой отмечена зона ненасыщенной фильтрации.

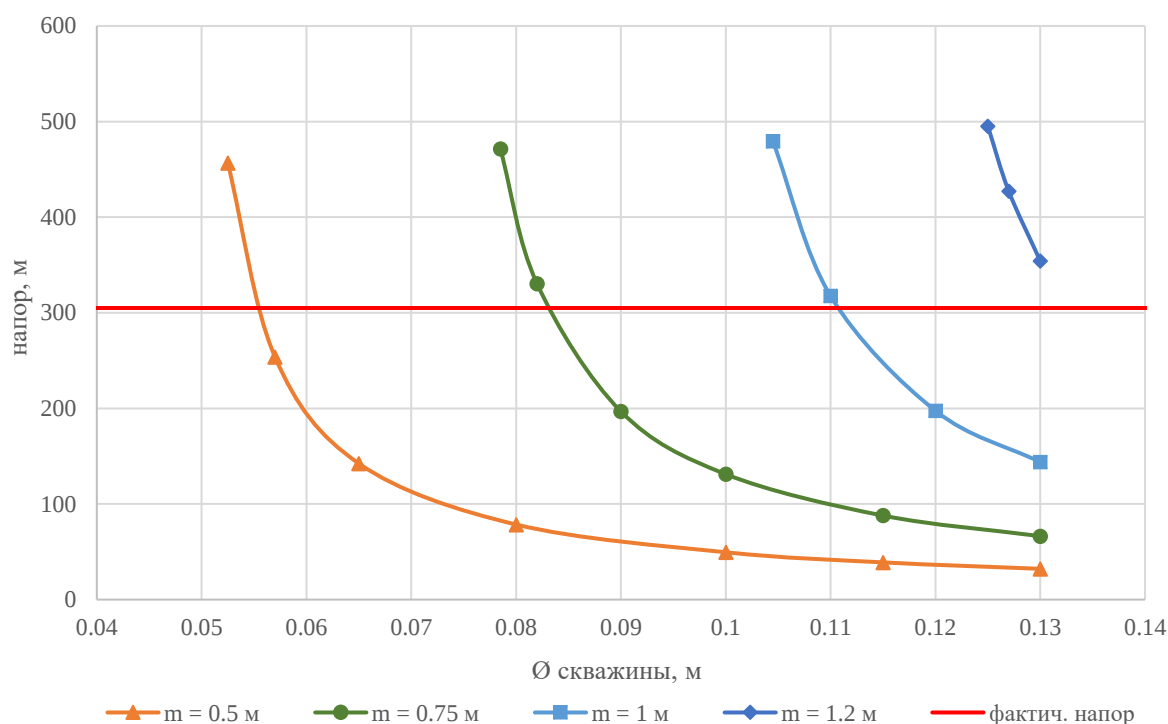


Рисунок 5.7 – График изменения величин предельных напоров при различных значениях параметров m и b для неблагоприятных условий (бурение во вторично увлажненных БЖР)

Из иллюстрации предельных напоров можно заметить, что при остаточной мощности целика более 1,2 м прорыв подземных вод из НВГ в стволы опытных скважин диаметрами менее 0,13 м теоретически не возможен. Учитывая полученный результат, степень геологической изученности и общий фонд геологоразведочных скважин, пробуренных на водозащитную толщу за периоды разведки и эксплуатации месторождения, а также выполненную оценку положения границы зоны ненасыщенной фильтрации, можно существенно снизить прорывоопасность при проведении пневмоиспытаний пород ВЗТ.

5.6 Мероприятия по снижению прорывоопасности подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта

Как отмечалось в первой главе, существует несколько подходов к оценке и прогнозированию возможности прорыва подземных вод из подрабатываемого водного объекта. Исходя из литологических, физико-механических, гидрогеологических и других характеристик рассматриваемого массива определяется механизм прорыва целика. В условиях Яковлевского месторождения более 90% объема водозащитной толщи сложено богатыми железными рудами, представленными разнотернистыми песчано-глинистыми несвязными разностями. Таким образом, прогнозирование прорыва подземных вод на основе методов оценки высоты распространения зоны водопроводящих трещин, характерной для скальных и полускальных пород, не представляется возможным. Ввиду отсутствия многолетнего накопленного опыта борьбы с прорывами в условиях месторождений богатых железных руд КМА, использование

выведенных эмпирических зависимостей по примеру Донецкого угольного бассейна, также не осуществимо.

В данном случае, наиболее удовлетворяющим условиям месторождения является опыт оценки возможности прорыва по зависимости Мироненко В.А.-Шестакова В.М., реализованного в диссертационных работах Тимченко А.А. и Феллер Е.Н. под руководством профессора Дашко Р.Э. (формула 1.2.2). В рамках данных работ была определена максимальная критическая величина напора на кровле целика Яковлевского рудника, которая обеспечивала бы безопасное ведение горных работ под водным объектом с учетом возможного вторичного увлажнения руд и снижения их прочностных свойств. Критическая величина напора составляет 215 м [46, 72, 73].

Учитывая текущие (2022 г) значения напоров в плане над очистным пространством на подошве НВГ, составляющие 300-310 м, сохраняется потенциальная возможность прорыва подземных вод в горные выработки Яковлевского рудника. Пути решения вопроса могут быть как инженерно-мелиоративные мероприятия по увеличению прочностных свойств пород целика, так и дренирование НВГ с целью снижения его напоров до безопасной величины.

В рамках данной диссертационной работы рассмотрен второй вариант борьбы с прорывами подземных вод. При разработке конкретных рекомендаций необходимо исходить не только из гидрогеологических параметров водоносного горизонта, но и ориентироваться на его расположение: ввиду того, что кровля НВГ над зоной ведения очистных работ расположена на глубинах более 500 м., проходка скважин с дневной поверхности гораздо более затратна, чем сооружение восстающих скважин.

Выбор оптимального варианта дренирования НВГ системой восстающих перепускных скважин производился из следующих их конфигураций:

- дренажный контур из 21 скважины на удалении 200-250 м друг от друга;
- дренажный контур из 13 скважин на удалении 250-400 м друг от друга;
- дренажный контур из 8 скважин на удалении 250-600 м друг от друга.

С помощью модуля «Водоем, площадьная река» в программе «Нимфа» задавались дрены в соответствии с выбранным сценарием. С помощью метода дополнительных фильтрационных сопротивлений дрен в соответствующих блоках модели можно учесть несоответствие размера блока и скважины по формуле 5.1, предложенной в работе [121]:

$$\Phi = \frac{1}{T_c} \left(\frac{\ln\left(\frac{\Delta x}{r_c}\right)}{2\pi} - 0,25 \right) \quad (5.1)$$

где: Φ – фильтрационное сопротивление дрены, сут/м²; T_c – проводимость моделируемого слоя, м²/сут; Δx – размер ребра блока в плане, приведённого к квадрату

эквивалентной площади или размер ребра квадратного блока в плане, м; r_c – радиус задаваемой скважины, м (0,048 м).

При этом коэффициент перетока дрены, используемый в выбранном программном продукте как параметр удельной проводимости дрены, рассчитывается по формуле 5.2:

$$k = \frac{1}{\Phi \cdot F} \quad (5.2)$$

где: k – коэффициент перетока, 1/сут; Φ – фильтрационное сопротивление дрены, сут/м²; F – площадь блока, м².

Таким образом, учитывая заданный сеточный размер в пределах рудника, коэффициент перетока всех дрен контура дренирования составил 0,51 сут⁻¹.

Оценка эффективности каждого варианта системы совершенных по степени и характеру вскрытия НВГ дрен производилась в нестационарной постановке на модели, описанной в разделе 3.3.

При единовременном включении системы дрен реализация каждого сценария демонстрирует снижение напоров в относительно короткие сроки (до 1,5 месяцев). Очевидно, что контур, состоящий из 21 скважины, будет иметь наиболее короткое время достижения безопасных напоров (9 суток), в то время как контур из 8 скважин – наиболее длительный период (38 суток). Хронологический график снижения напоров на подошве НВГ для каждого из предложенных вариантов представлен на рисунке 5.8.

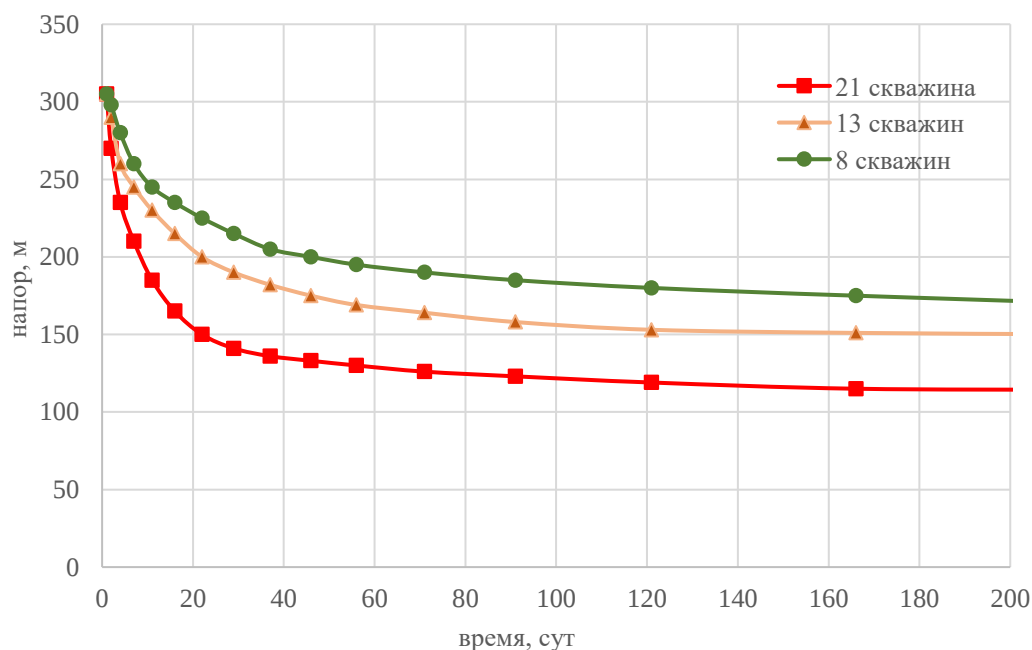


Рисунок 5.8 – График изменения напоров на подошве НВГ при работе дренажного контура в нестационарной постановке задачи

Соответствующие понижения напора притоки в рудник при эксплуатации скважин и к дренажному контуру в отдельности представлены на рисунке 5.9. Следует заметить, что период повышенного притока подземных вод составляет порядка 90 дней для всех рассмотренных

вариантов, а различия в абсолютных значениях между контурами из 8 и 21 скважинами за этот период снижается с 48000 м³/сут до 20000 м³/сут.

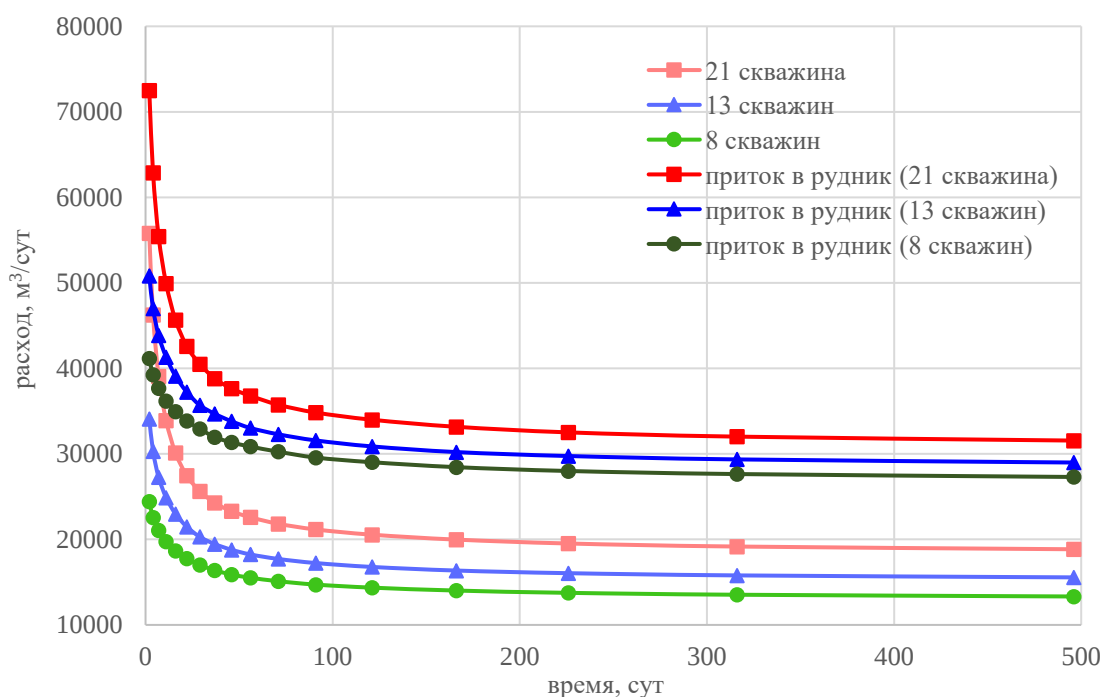


Рисунок 5.9 – График изменения водопритоков к дренажному контуру и руднику в целом для рассматриваемых вариантов в нестационарной постановке задачи

Учитывая время снижения напоров на подошве НВГ до безопасных (215 м), время и затраты на сооружение контура скважин, а также прогнозные притоки, для снижения прорывоопасности при ведении горных работ под водным объектом целесообразным является строительство контура из 8 скважин.

Поскольку после 37-х суток понижения напоров контур из 8 скважин продолжает дренировать НВГ и обеспечивать повышенный водоприток в рудник, необходимо предусмотреть снижение пропускной способности на устье скважин путем сооружения запорной арматуры до значений, удовлетворяющих поддержанию напора в 215 м.

В данном случае, для обоснования необходимого дебита дренажного контура, на геофильтрационной модели была произведена серия стационарных решений по подбору проводимости дрен, обеспечивающих приток в количестве, достаточном для поддержания напоров на подошве НВГ величиной 215-205 м.

Найденное решение характеризуется установившимся притоком к дренажному контуру скважин в размере 7300 м³/сут, увеличением общего водопритока в рудник с 16800 м³/сут до 22200 м³/сут., а также снижением притока к очистным и капитальным выработкам с 16800 м³/сут до 14900 м³/сут, что вызвано снижением градиента и величины нисходящего перетекания из НВГ. Карта распределения напоров в стационарной постановке (на этапе поддержания напоров) в НВГ представлена на рисунке 5.10.

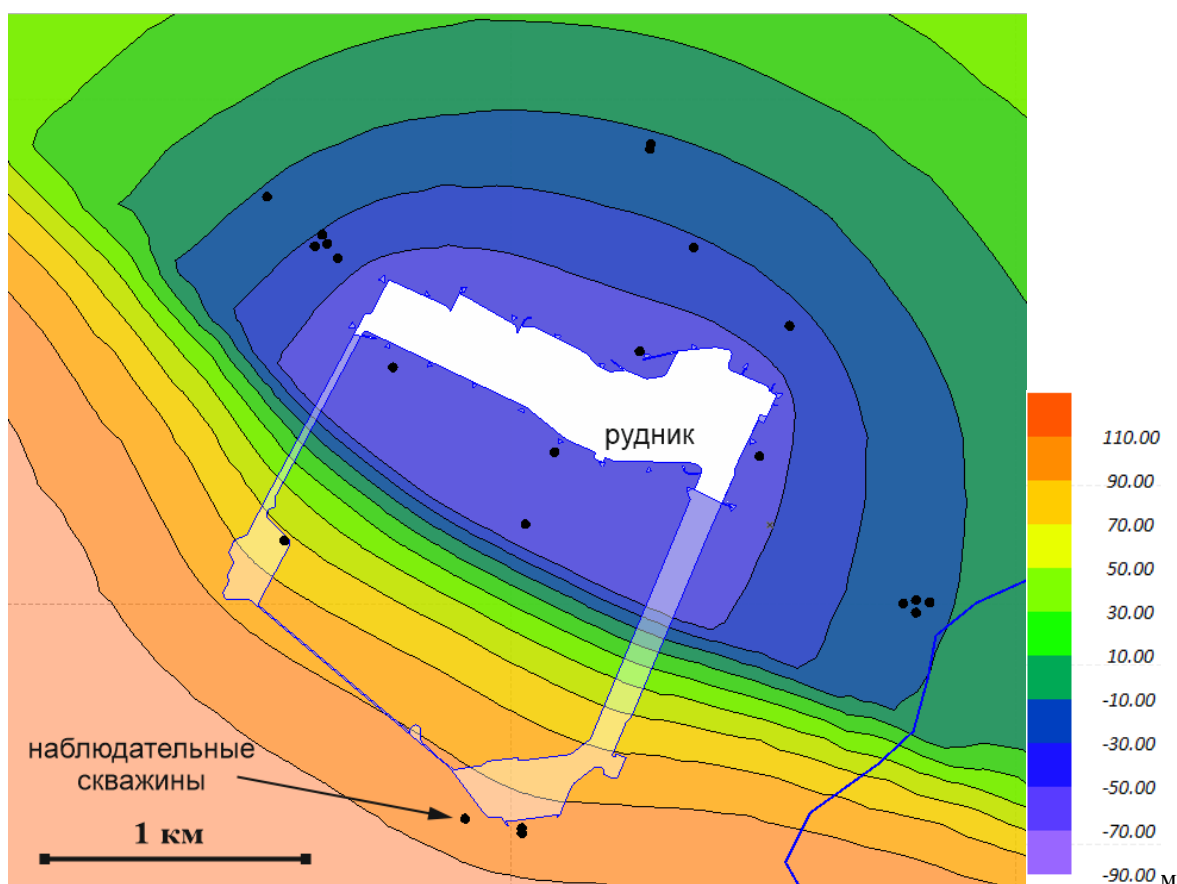


Рисунок 5.10 – Карта гидроизопьез в НВГ (в метрах) в условиях установившегося режима

Таким образом, общая производительность системы перепускных дренажных скважин путем регулировки их пропускной способности для поддержания безопасного напора должна составлять $7300 \text{ м}^3/\text{сут}$. Данный подход позволит в короткие сроки снизить опасность прорыва подземных вод в горные выработки при подработке водного объекта по типу поперечного сдвига, оптимизировать затраты на бурение системы перепускных скважин, контролировать минимальные водоприток в рудник путем регулировки расхода на устьях.

Как известно, осушение водоносных горизонтов приводит к росту эффективных напряжений в массиве из-за снижения нейтральных напряжений, что сказывается на уплотнении горных пород и оседании дневной поверхности. Следовательно, рост эффективных напряжений равен модулю изменения нейтральных, рассчитываемых как:

$$\Delta\sigma_3 = -\Delta\sigma_n = -S \cdot \gamma \quad (5.3)$$

где: S – понижение уровня подземных вод, м; γ – удельный вес воды, 9810 Н/м^3 ; $\Delta\sigma_3$ – изменение эффективных напряжений, $\Delta\sigma_n$ – изменение нейтральных напряжений.

В рамках модели деформирования горной породы коэффициентом пропорциональности между её относительной деформацией и напряжением является модуль общей деформации E_0 . Учитывая вышесказанное, оценка возможных максимальных оседаний производилась по зависимости 5.4:

$$\Delta h = \frac{s \cdot \gamma \cdot h}{E_0} \quad (5.4)$$

где: Δh – абсолютная деформация слоя, м; h – мощность слоя до водопонижения, м; E_0 – модуль общей деформации, Па.

Оседание дневной поверхности будет складываться из суммы оседаний каждого гидрогеологического подразделения после снижения напора. Результаты расчетов приведены в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Расчетные параметры и оседания пород при работе дренажного контура

	H₁, м	H₂, м	S, м	γ, Н/м³	h, м	E₀, МПа	Δh, м
Q-P	195	192	3	9810	39	470	0.0024
K ₂ t-maa 1	194	191	3	9810	43	6300	0.0002
K ₂ t-maa 2	166	163	3	9810	170	6300	0.0008
K ₂ alb-sm	136.1	130.8	5.2	9810	41	470	0.0045
J ₃ tīt-K1bar	136.1	130.7	5.4	9810	51	3640	0.0007
J ₂ ox-kim	136.1	130.6	5.5	9810	69	460	0.0081
J ₂ bt	136	130.1	5.9	9810	28	469	0.0035
J ₂ bt-bj	67.5	20	47.5	9810	40	470	0.0397
C1	10	-90	100	9810	55	3600	0.0150
СУММА							0,075

Обобщая результат, полученный в данном разделе, следует отметить целесообразность дренирования НВГ с целью повышения безопасности ведения горных работ. Было установлено, что максимальный приток в рудник в первые ~40 суток эксплуатации дренажного контура из 8 восстающих перепускных скважин будет снижаться в диапазоне с 41000 м³/сут до 31000 м³/сут. Далее, для поддержания безопасной величины напора, регулируется пропускная способность скважин до суммарного равномерно распределённого расхода дренажного контура в размере 7300 м³/сут. Такой подход позволит стабилизировать водопиток в рудник на ~22200 м³/сут, и ограничить деформации дневной поверхности величиной до 7,5 см.

5.6 Выводы по V главе

Учитывая требования, предъявляемые нормативными документами в области ведения гидрогеологического мониторинга на месторождениях твердых полезных ископаемых, особенности горно-геологических условий разработки Яковлевского месторождения, а также тезис об адаптации системы мониторинга к изменяющимся гидрогеологическим условиям, существует необходимость и потенциал совершенствования гидрогеологического мониторинга на Яковлевском месторождении.

Повышение чувствительности и информативности натурных наблюдений к изменяющимся гидрогеологическим условиям при подработке водозащитного целика может

быть осуществлено путем оптимизации измерений уровней подземных вод горизонтов нижнего комплекса. Было показано, что рекомендуемая периодичность измерений для скважин лежачего бока НВГ и всех скважин РВГ составляет раз в 3-4 дня, а для скважин, оборудованных на НВГ над очистными выработками и в висячем боку – каждые 12 часов. Также предложен способ корректировки периодичности измерений на основе сопоставления средней скорости изменения уровней подземных вод с ошибкой измерения и критерии применимости данного способа.

Увеличение частоты замеров минерализации и концентрации хлорид иона в главном рудничном водосборнике не позволяет повысить эффективность гидрогеологического мониторинга. Однако, это справедливо при текущей точности измерения компонентов.

Ввиду того, что сооружение густой сети гидронаблюдательных скважин в зоне сдвижения над очистными выработками сопряжено с высокой вероятностью выхода их из строя, предложен альтернативный метод повышения информативности и чувствительности мониторинга с помощью дискретизации очистного пространства на балансовые зоны по технологическим блокам, на которых рекомендуется установка оборудования для замеров расходов и минерализации дренажных вод. Такой подход позволит оперативно реагировать на изменения проницаемости водозащитной толщи, локализовать участки интенсификации перетекания подземных вод из НВГ, принимать необходимые меры по водоотведению и закладке выработанного пространства.

Вместе с тем, дискретизация зоны ведения очистных работ на водобалансовые зоны позволит установить функцию изменения вертикального фильтрационного сопротивления пород водозащитной толщи от деформаций рудной потолочины по алгоритму, предложенному в разделе 4.5. При наличии информации о напорах в НВГ, данная функция может использоваться для прогноза водопритока из НВГ в горные выработки рудника на первоочередном и прилегающих участках Яковлевского месторождения.

На построенной автором геофильтрационной математической модели были разработаны рекомендации по дренированию НВГ для снижения прорывоопасности в горные выработки рудника как самого опасного инженерно-геологического процесса на Яковлевском месторождении. Предложены параметры восстающих дренажных скважин, их дебиты на этапах дренирования и поддержания безопасного напора, рассчитана осадка дневной поверхности в результате водопонижения. Установлено, что максимальный приток в рудник в первые ~40 суток эксплуатации дренажного контура из 8 восстающих перепускных скважин будет снижаться в диапазоне с 41000 м³/сут до 31000 м³/сут. Далее, для поддержания безопасной величины напора, регулируется пропускная способность скважин до суммарного равномерно распределённого расхода дренажного контура в размере 7300 м³/сут. Такой подход позволит

стабилизировать водоприток в рудник на $\sim 22200 \text{ м}^3/\text{сут}$, и ограничить деформации дневной поверхности величиной до 7,5 см.

Определено положение границы зон насыщенной и ненасыщенной фильтрации в теле ВЗТ (2022 г) на разработанной автором геофильтрационной модели. Данная оценка, совместно с проведёнными расчетами устойчивости остаточной мощности целика на прорыв (по формуле Мироненко-Шестакова) позволит уточнить интервалы бурения и фильтрационного опробования пород ВЗТ, снизить риск прорывов вод из НВГ в рамках проведения предусмотренных проектом пневмоиспытаний.

На основе результатов V главы можно сформулировать 3-е защищаемое положение: *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.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

На основе анализа и обобщения ранее проведённых исследований геолого-гидрогеологических естественных и техногенно-нарушенных условий Яковлевского месторождения, а также собственных полевых работ автора, были выявлены предпосылки увеличения проницаемости водозащитной толщи в процессе добычи богатых железных руд и интенсификация нисходящего перетекания подземных вод из НВГ.

Проведена схематизация гидрогеологических условий Яковлевского месторождения, в рамках которой учтено общее моноклинальное залегание гидрогеологических подразделений осадочной толщи, профильные и плановые фильтрационные неоднородности, а также наличие сдвижения подрабатываемых горных пород водозащитной толщи – зоны с переменным вертикальным коэффициентом фильтрации. Построена геофильтрационная модель Яковлевского месторождения.

Гидрохимическим (по формулам смешения растворов) и гидродинамическим (на основе математического моделирования) методами установлены закономерности изменения схемы формирования водопритока к очистным выработкам Яковлевского рудника вследствие техногенного увеличения проницаемости водозащитного целика при его подработке. Получены хронологические изменения абсолютных величин и долей водопритока к очистному пространству из НВГ и РВГ. Так, в период с 2005 по 2022 гг. величина водопритока из НВГ выросла по экспоненциальному закону в 9 раз (с 43 м³/ч до 386 м³/ч) при неизменном контуре дренирования.

Выявлены, а также теоретически и статистически обоснованы эмпирические зависимости для прогнозирования водопритока к очистному пространству на основе ряда факторов: приращения объема пустот, оседаний подрабатываемого массива, понижений в водоносных горизонтах нижнего комплекса, минерализации и концентрации хлорид иона в дренажных водах главного водосборника. Выработаны критерии применимости предложенных зависимостей для первоочередного участка отработки месторождения.

Решение обратной задачи на построенной геофильтрационной модели в эпигнозной постановке (с 2005 по 2022 гг) позволило получить функцию изменения вертикального фильтрационного сопротивления пород ВЗГ от деформаций рудной потолочины на первоочередном участке отработки. Вместе с тем, предложен алгоритм получения данной функции для прогнозирования водопритока от перетекания в будущем на соседних участках отработки месторождения.

Обоснованы способы адаптивного совершенствования гидрогеологического мониторинга путем оптимизации периодичности измерений уровней подземных вод и дискретизации очистного пространства на несколько водобалансовых зон. Такая постановка мониторинга позволит повысить чувствительность всей системы, локализовать участки интенсификации процесса перетекания подземных вод из НВГ и сократить время принятия соответствующих оперативных решений.

Даны практические рекомендации по дренированию НВГ до значений напоров, соответствующих безопасным с точки зрения прорывоопасности подземных вод НВГ в горные выработки рудника: определены дебиты дренажных скважин на этапах снижения и поддержания безопасного напора, соответствующие изменения водопритоков в рудник в нестационарной постановке, а также оседания дневной поверхности вследствие снижения порового давления в НВГ. Вместе с тем, практические рекомендации касаются проведения предусмотренных проектом разработки Яковлевского месторождения пневмоиспытаний пород ВЗТ: на геофильтрационной модели проведена оценка положения зоны ненасыщенной и насыщенной фильтрации в теле ВЗТ, построен график безопасных соотношений диаметров опытных скважин и остаточной величины целика (между забоем скважины и подошвой НВГ).

Будущие перспективы исследования лежат в области расширения направлений применения результатов на других месторождениях твердых полезных ископаемых, отрабатываемых под неосушенными водоносными горизонтами. По-прежнему актуальными являются задачи изучения особенностей гидрогеомеханических и гидрохимических процессов в теле водозащитной толщи при её подработке. Дополнительного внимания требуют вопросы управления подземными водами для хозяйственно-питьевого водоснабжения в трансграничной зоне разработки Яковлевского месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Норватов Ю.А., Сергутин М.В. Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки горного института. 2015. – Т. 212. С. 89-94.
2. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Горнопромышленная гидрогеология: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1989. 287 с.
3. Куликова А.С. К вопросу об эколого-экономической оценке инновационных решений при использовании подземного пространства под водными объектами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. – № 8. С. 279-286.
4. Ковалёв О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В.: Особенности безопасной разработки калийных месторождений. Мн.: Полымя. 1982. 96 с.
5. Baryakh A.A., Fedoseev A.K., Lobanov S.Yu. Deformations and fracture of rock strata during deep level potash mining // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 32. P. 109-116.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 18.04.2016 № 317 «О реализации Национальной технологической инициативы»
7. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (утверждены Указом Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899).
8. Прогноз научно-технологического развития России на период до 2030 года (утвержден Председателем Правительства Российской Федерации 03.01.2014).
9. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642).
10. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. К вопросу оценки формирования напряженно-деформированного состояния подкарьерной потолочины численными методами // Интерэкспо Гео-Сибирь, №. 2-3, 2016, с. 39-44.
11. Барышников В.Д., Гахова Л.Н., Прогнозная оценка условий отработки подкарьерных запасов на руднике «Айхал» при понижении горных работ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. – №. 2. С. 177-182.
12. Барышников В.Д., Гахова Л.Н.. Формирование напряженного состояния вблизи горных выработок в переходной зоне от открытой к подземной отработке месторождения // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. – №. 2. С. 170-175.
13. Мальцева И.А. Обоснование и выбор параметров отработки подкарьерных запасов трубки "Мир" // Неделя горняка. 2002. – № 1.
14. Мальцева И.А., Иофис М.А. Природа и механизм образования водопроводящих трещин в массиве горных пород // Семинар "Неделя горняка". - 2002.

15. Методические указания по гидрогеологическому обслуживанию угледобывающих предприятий / Норватов, Рюмин, Сердюков, Стрельский, Мольский, Мироненко, Ксенда, Момчилов, Невельштейн, Под ред. Пахоменко Л.А. - Ленинград: ВНИМИ, 1975. - 52 с.
16. Норватов Ю.А., Сергутин М.В., Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом // Записки Горного института., - Т. 212. 2015, - С. 89-94.
17. Дроздов А.В., Крамсков Н.П., Гензель Г.Н. Особенности гидрогеомеханического мониторинга под водными объектами на алмазных месторождениях западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - №1. С. 72-79.
18. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.
19. Митишова Н.А. Особенности подработки водных объектов при наличии в толще пород водозащитного слоя // Доклад на симпозиуме "Неделя горняка". - 2001.
20. Митишова Н.А. Оценка возможности прорывов подземных и поверхностных вод в горизонтальные и наклонные горные выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. – № 5. С. 234-240
21. Митишова Н.А. Условия выемки угольных пластов под водными объектами // семинар "Неделя горняка". 2002.
22. Мохов А.В. Оценка прорывоопасности очистной выемки каменноугольных пластов с обрушением кровли под водными объектами // Вестник науки ЮНЦ РАН. - 2011.
23. Норватов Ю.А., Д.И. Савельев., Яшина А.В. Гидрогеологическое обеспечение горных работ при разработке угольных месторождений подземным способом // Записки горного института. 2014. – № 8. С. 23-28.
24. Инструкция по безопасному ведению горных работ у затопленных выработок. (Госгортехнадзор РФ, Минтопэнерго РФ, Гос.науч.-ислед. ин-т геомех. и маркшейд. дела) - М., 1995
25. Стась Г.В., Смирнова Е.В., Перелыгин И.А., Перелыгина Я.А. Системный подход к оценке риска аварий при восстановлении Подмосковского угольного бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2016.
26. Мозер С.П. Мониторинг состояния водозащитной толщи на калийных рудниках/ Мозер С.П., Ковалев О.В., Тхориков И.Ю.// *Górnictwo i geologia*, Гливице, 2010. – Том 5. – С. 89-102.
27. Момчилов В.С. Защита шахт от подземных вод. - М.: Недра, 1989. 189 с.
28. Ковалев О.В., Шувалов Ю.В., Тхориков И.Ю., Мозер С.П., Трошиненко Г.А.: Способ контроля состояния водозащитной толщи на месторождениях калийных солей. Патент РФ №2300789 от 10 июня 2007 г.

29. Нисковский Ю.Н. Исследование и выбор экологически допустимых технологий добычи полезных ископаемых под морским дном // Конференция "Экологические проблемы горного производства переработка и размещение отходов". – 1995.
30. Еременко А.А., Еременко В.А., Колтышев В.Н., Башков Е.Н., Щептев Е.Н., Штирц В.А. Особенности развития очистных работ в предохранительных целиках под промышленными и водными объектами // Научный вестник ИПКОН РАН. - 2011.
31. Кутепов, Ю.И. Обоснование безопасных условий подземной отработки свиты угольных пластов под гидроотвалом / Ю.И. Кутепов, А.С. Миронов, Ю.Ю. Кутепов, М.В. Саблин, Е.Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 8. – С. 217-226.
32. Пермяков Р.С., Ковалёв О.В., Пинский В.Л. и др.: Справочник по разработке соляных месторождений. Недра, Москва 1986. 209 с.
33. Dumpleton S. Effects of longwall mining in the Selby Coalfield on the piezometry and aquifer properties of the overlying Sherwood Sandstone // Mine water hydrogeology and geochemistry. 2002. no. 198 pp. 75-88
34. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование разработки Яковлевского месторождения под неосушенными водоносными горизонтами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. – № 4. – С. 27-37.
35. Дашко Р.Э., Волкова А.В. Исследование возможности прорывов подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в горные выработки Яковлевского рудника // Записки Горного института, №. 168, 2006, С. 142-148
36. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира / Е.Н. Батулин, Е.А. Меньшикова, С.М. Блинов и др. // Современные проблемы науки и образования. 2012. – № 6. – С. 6-13.
37. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. - М.: ИМР. 1997. 180 с.
38. Гусев В.Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин. - СПб.: СПГГИ. 1999. 156 с.
39. Гусев В.Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. – Т. 221. С. 638-643.
40. Куликова Е.Ю. Механизм и условия возникновения трещиной водопроводимости породного массива в условиях его подработки. 2001. – 376 с.

41. Петухов, И.А. Основные направления исследований сдвижений горных пород, охраны сооружений и природных объектов при разработке угольных месторождений / И.А. Петухов // Труды ВНИМИ. – Л.: ВНИМИ, 1976. – № 100. – С. 77-85.
42. Медянцев, А.Н. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием горных выработок / А.Н. Медянцев – Новочеркасск: НПИ, 1976. – 84 с
43. Кратч, Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений / Г. Кратч – М.: Недра, 1978. – 494 с.
44. Малюхина Е.М. Обоснование параметров геомеханических процессов развития техногенных водопроводящих трещин при разработке железорудных месторождений: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16 / Малюхина Елена Михайловна. – Санкт-Петербург, 2020. – 102 с.
45. Уотсон, Х.Ф. Добыча угля в северо-восточной Англии из пластов, залегающих под морским дном //X Всемирный горный конгресс, сентябрь – 1979 год, Стамбул – Турция.
46. Феллер Е.Н. Прогнозирование изменения инженерногеологических условий при ведении очистных работ на яковлевском руднике (яковлевское месторождение богатых железных руд, кма): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение" / Феллер Екатерина Николаевна. – Санкт-Петербург, 2014. – 25 с.
47. Антонов В.В. Поиски и разведка подземных вод: Учебное пособие / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб 2006. 94 с.
48. Ефимов В.И., Куликова А.С., Попов С.М., Маликов А.А. О путях предотвращения прорывов воды в горные выработки из затопленных каменноугольных шахт // Доклад в «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций». - 2010.
49. Ефимов В.И., Куликова А.С., Попов С.М., Маликов А.А. Оценка приоритетов при выборе композитных материалов и конструкций для сооружения коммуникаций под водными объектами // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2019. – № 2. С. 152-160.
50. Золотых С.С., Красюк Н.Н., Максименко Ю.М., Технология отработки нарушенных участков выемочных полей с оперативным химическим упрочнением углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. – № 1. С. 165-169
51. Климчук И. В., Чубриков А. В. Опыт упрочнения нарушенных участков угольных пластов органоминеральной смолой Вилкит-Е в Кузбассе // Глюкауф. 2003. – № 1. С. 12-16.
52. Чубриков А. В., Марков А. С., Хрипков В. В. Технология упрочнения зон нарушения полимерной смолой для сохранения высоких нагрузок на очистной забой // Уголь. 2005. – № 5. С. 44-49.

53. Решетняк С.Н., Максименко Ю.М. Анализ материалов упрочнения нарушенных участков углепородного массива при ведении выемочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. – № 11. С. 39-45.
54. Рыльникова М.В., Олизаренко В.В., Михальчук А.П. Формирование и сооружение изолирующих перемычек в горных выработках подземных рудников под заполняемым хвостовой пульпой карьером // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. – № 1. С. 124-137.
55. Акимов, А.Г. Геомеханические аспекты сдвижения горных пород при подземной разработке угольных и рудных месторождений / А.Г. Акимов –СПб.: ВНИМИ, 2003. – 166 с.
56. Мироненко В.А. Динамика подземных вод: Учебник для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Издательство МГГУ. 2009. 519 с.
57. Степанов Ю.А. Компьютерное моделирование в задаче обеспечения безопасности ведения горных работ // Вестник научного центра по безопасности ведения горных работ в угольной промышленности. 2016. – № 1. С. 67-72.
58. Сеннов А.С. К вопросу об использовании гидрогеологического программного обеспечения // Вестник СПбГУ. 2006. – № 7. – С.1-4.
59. Коротков А.И., Павлов А.Н. Гидрохимический метод в геологии и гидрогеологии. Ленинград: Недра, 1972. 184 с.
60. Мохов А.В. Подземные воды как индикатор геомеханических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. – № 3. С. 273-281
61. Куликова Е.Ю. Предпосылки прорыва подземных и поверхностных вод в горные выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1996. – № 6. С. 109-113
62. Леоненко И.Н., Русинович И.А., Чайкин С.И. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии. Том 3. Железные руды – М.: Недра. 1969. 319 с.
63. Гусев В.Н., Дашко Р.Э., Петров Н.С. Основные принципы организации и развития гидрогеомеханического мониторинга в подземных выработках Яковлевского рудника // Записки горного института. 2006. – Т. 168. С. 149-158.
64. Гусев В.Н., Илюхин Д.А., Алексенко А.Г. Определение параметров зоны водопроводящих трещин через горизонтальные деформации подрабатываемой толщи // Записки Горного института. 2013. – Т. 204. С. 69-73.
65. Гусев В.Н., Илюхин Д.А., Журавлев А.Е. Оценка степени нарушения подрабатываемой толщи техногенными водопроводящими трещинами по данным геомеханического мониторинга в горных выработках Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2013. – Т. 204. С. 74-81.

66. Протосеня А.Г., Петров Д.Н., Синякин К.Г., Марьемьянов Г.А. Натурные наблюдения за осадкой рудной потолочины при ведении горных работ на Яковлевском руднике // Записки горного института. 2011. – Т. 190. С. 158-162.
67. Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Плащинский В.Ф. Оценка устойчивости обнажений и расчет нагрузок на крепь выработок Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2006. – Т. 168. С. 115-122.
68. Пахалуев В.Ф., Огородников Ю.Н., Зыков Д.Б., Максимов А.Б. Деформации рудного обнажения за крепью КМП-А3 // Записки Горного института. 2006. – Т. 168. С. 175-180.
69. Григорьев А.М., Зотеев О.В., Макаров А.Б. Геомеханическое обоснование мониторинга массива при разработке руд Яковлевского месторождения КМА под неосушенными водоносными горизонтами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. – № 4. С. 27-37.
70. Трушко В.Л., Протосеня А.Г., Дашко Р.Э. Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения // Записки Горного института. 2010. – Т. 185. С. 9-18.
71. Дашко Р.Э., Волкова А.В. Исследование возможности прорывов подземных вод из нижнекаменноугольного водоносного горизонта в горные выработки Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2006. – Т. 168. С. 142-148.
72. Тимченко А.А. Комплексный подход к изучению, оценке и использованию подземных вод Яковлевского месторождения богатых железных руд (кма): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.07 "Гидрогеология" / Тимченко Анна Андреевна. – Санкт-Петербург, 2007. – 21 с.
73. Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике // Записки Горного института. 2012. – Т. 199. С. 151-160.
74. Дашко Р.Э., Ковалёва Е.Н. Гидрогеологический мониторинг на Яковлевском руднике как инструмент повышения безопасности ведения очистных работ в сложных горно-геологических условиях // Записки горного института. 2012. – Т. 195. С. 48-52.
75. Дашко Р.Э., Ковалева Е.Н. Комплексный мониторинг подземных вод на Яковлевском месторождении богатых железных руд и его роль в повышении безопасности ведения горных работ в условиях неосушенных водоносных горизонтов // Записки горного института. 2011. – Т. 190. С. 78-85.
76. Дашко Р.Э., Алексеев И.В. Микробная деятельность в подземных выработках и ее влияние на свойства богатых железных руд и конструкционных материалов // Записки Горного института. 2006. – Т. 168. С. 165-174.

77. Дашко Р.Э., Алексеев И.В. Значение микробиологических процессов при геотехническом и инженерно-геологическом обеспечении устойчивости подземных выработок Яковлевского рудника (Курская магнитная аномалия) // Геотехника. 2013. – №4. С. 20-31.
78. Бабушкин, В.Д. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых (методическое руководство). / В.Д. Бабушкин, Д.И. Пересунько, С.П. Прохоров, Г.Г. Скворцов // М.: Недра, 1969. 408 с.
79. Отчет о разведке Яковлевского железорудного месторождения и геолого-поисковых работах, выполненных в Белгородском железорудном районе в 1954-56г.г. (Гидрогеологические и инженерно-геологические условия). Саар А. А. и др. ОГФ, 1956.
80. Отчет о разведке Яковлевского железорудного месторождения и геолого-поисковых работах, выполненных в Белгородском железорудном районе (гидрогеологические и инженерно-геологические условия) по состоянию на 1.10.58 г. Саар А. А. и др. ОГФ, 1958.
81. Отчет о геологоразведочных и поисковых работах, произведенных на Яковлевском железорудном месторождении Белгородского железорудного района КМА по состоянию на 1.10.1958. С.И. Чайкин, А.А. Саар и др. М.: Главгеология РСФСР. 1958.
82. Отчет о бурении разведочных скважин на участке первоочередной отработки Яковлевского месторождения 1982-1986 гг. Татьянин В.Д., Трубников Ю.А. и др. ПГО «Центроруда». 1986. 193 с.
83. Опыт водопонижения на месторождениях полезных ископаемых со сложными гидрогеологическими условиями. М.: АН СССР. 1963.
84. Сводный отчет об опытном водопонижении на Яковлевском месторождении КМА. А.Я. Гуркин, И.П. Твердохлебов и др. ЦНИИгоросушение. 1962.
85. Отчет по результатам инженерных изысканий. Книга 18 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания. Гидрометеорологическая изученность. Физико-географическая характеристика р. Ворскла. Пояснительная записка. П.В. Трунов, Е.В. Кичигин и др. ЭКОТОН. 2010. 71 с.
86. Пояснительная записка к Государственной геологической карте М 1:200 000. Серия Воронежская. Лист М-37-VII (Обоянь). О.В. Бабайцев, А.В. Василенко и др. М.: МФ ВСЕГЕИ. 2013. 227 с.
87. Бахтина И.Л., Лобут А.А., Мартюшов Л.Н. Методология и методы научного познания: Учебное пособие // Урал. Гос. Пед. Ун-т. – Екатеринбург, – 2016. 119 с.
88. Коносавский П.К., К.А. Соловейчик. Математическое моделирование геофильтрационных процессов: Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГТУ. 2001. 98 с.

89. Азиз Х., Сеттари Э., Математическое моделирование пластовых систем. М.: Недра. 1982. 407 с.
90. О.И. Бутнев, М.Л. Глинский, И.В. Горев, А.А. Куваев, П.А. Машенькин, В.А. Пронин, М.Е. Семёнов, М.Л. Сидоров. Комплекс программ "Нимфа" для решения задач нелинейной однофазной фильтрации жидкости и тепломассопереноса в пористых средах // ВК. 2017. – № 1. С. 58-66.
91. Алейников А. Ю., Барабанов Р. А., Бартенев Ю. Г., Ерзунов В. А., Карпов А. П., Кузнецов В. Ю., Петров Д. А., Резчиков В. Ю., Стаканов А. Н., Щаникова Е. Б. Параллельные решатели СЛАУ в пакетах программ Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. – Вып. 47. С. 73-92.
92. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: изд. РГГМУ. 2007. 279 с.
93. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. Том. 1. Первичный анализ и построение эмпирических зависимостей. СПб.: РГГМУ. 2020. 256 с.
94. Афанасьев В.В. Теория вероятностей. М.: ВЛАДОС. 2007. 350 с.
95. Fisher R.A., Yates F. Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, 6th ed. Longman Group, Ltd. London. 1963. 155 с.
96. ООО «Металл-групп» Яковлевский рудник, II очередь строительства. Корректировка. Поэтапное увеличение производственной мощности. ООО «СПб-Гипрошахт». 2018.
97. Технический проект осушения шахтного поля Яковлевского рудника КМА. Том I. Пояснительная записка. Белгород, ВИОГЕМ, 1970.
98. Авершин С.Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. М.: Углетехиздат, 1954. 324 с.
99. Авершин, С.Г. Некоторые свойства процессов сдвижения горных пород и вопросы расчета сдвижений // сб. тр. ВНИМИ. 1961. – № 43. С. 3-21.
100. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважины. М.: (ПНИИИС) ГОССТРОЯ СССР. 1986.
101. Антонов В.В., Мироненко В.А. Сравнительный анализ расчетных гидрогеологических параметров, определяемых одиночными и кустовыми откачками // Разведка и охрана недр, 1975, № 3, С. 45-49.
102. Ерыгин Д.П., Шишкин Е.А. Методика решения задач по химии: Учеб. пособие для студентов пед. И н-тов по биол. и хим. спец. М.: Просвещение, 1989. 176 с.
103. Мироненко В.А., Шестаков В.М. основы гидромеханики. М.: Недра. 1974. 296 с.

104. Мироненко В.А. Гидрогеологические исследования в горном деле. В.А. Мироненко Ю.А. Норватов, Л.И. Сердюков и др. М.: Недра. 1976. 352 с.
105. Черкашин А.А. Оценка влияния технологических и природных факторов на объемы водопритоков в горные выработки угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. – № 8. С. 403-407.
106. Ягунов А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве. Кемерово: Кузбассвуиздат. 2010. 240 с.
107. Дашко Р.Э. Механика горных пород. М.: Недра. 1987. 264 с.
108. Rau G.C., Cuthbert M.O., Post V.E.A. et al. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice // Hydrogeology. 2020. no. 28. pp. 2963-2969.
109. Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. Утвержден первым заместителем Министра природных ресурсов Российской Федерации В.А. Пак 4 августа 2000 года.
110. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 года N 505.
111. Семенов С.М. Гидрогеологические прогнозы в системе мониторинга подземных вод. М.: Институт геоэкологии РАН. 2005. 131 с.
112. Методическое руководство определения границ зон, опасных по прорывам воды в горные выработки на месторождениях алмазов АК «АЛРОСА» / Крамсков Н.П. и др. Белгород. 2005. 101 с.
113. Временная инструкция по определению размеров предохранительного целика под водоносными горизонтами и водоёмами при отработке системами с твердеющей закладкой. Кривой Рог: Изд-во НИГРИ. 1988. 58 с.
114. Инструкция по определению границ зон, опасных по прорывам воды в горные выработки. Белгород: Ротапринт ВАОГЕМ. 1985. 36 с
115. Методические указания по натурному определению высоты зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством в конкретных горно-геологических условиях. Л.: ВНИМИ. 1977. 59 с
116. Указания по определению условий безопасной выемки угля под водными объектами и их охране. Л.: ВНИМИ. 1977. 59 с
117. Методические указания по гидрогеологическому обслуживанию угледобывающих предприятий. Л.: ВНИМИ 1975. 52 с.
118. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации гидротехнических сооружений на подрабатываемых горными работами территориях. М.: Стройиздат. 1981. 31 с.

119. Условия выемки угля под водными объектами. Л.: ВНИМИ. 1985. 4 с.
120. Рекомендации по определению фильтрационных характеристик горных пород в зоне неполного водонасыщения методом нагнетания воздуха в скважины при инженерных изысканиях в строительстве/ Москва: ГИДРОПРОЕКТ им С. Я. Жука МИНЭНЕРГО СССР. Стройиздат, 1976. – 23с.
121. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1988, 228 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акт внедрения

Утверждаю

Директор по проектированию
горных работ
ООО «СПб-Гипрошахт»



Д.В. Климов

Дата «14» сентября 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Целищева Николая Анатольевича,

соискателя ученой степени кандидата геолого-минералогических наук
по научной специальности 1.6.6, Гидрогеология

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель Директор по проектированию горных работ Д.В. Климов;

Члены комиссии: Главный инженер проектов В.Ю. Демин, Начальник ЦГТШС Д.П. Мирончук.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Закономерности изменения проницаемости водозащитной толщи в процессе эксплуатации Яковлевского рудника», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, использованы в деятельности ООО «СПб-Гипрошахт» в виде:

- экспериментальных данных геофильтрационного моделирования по обоснованию положения уровня подземных вод в теле водозащитной толщи;
- рекомендаций по гидрогеологическому мониторингу для повышения эффективности проведения пневмоиспытаний проницаемости предохранительного целика;
- предложений по оптимизации периодичности наблюдений за уровнями подземных вод в наблюдательных гидрогеологических скважинах.

Использование указанных результатов позволяет:

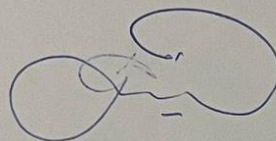
- уточнить схему формирования водопритока к горным выработкам Яковлевского рудника;
- локализовать участки для проведения пневмоиспытаний по определению фильтрационных параметров водозащитной толщи;

— повысить качество прогнозирования величины водопритока к очистным выработкам.

Приведённые результаты исследований из диссертации внедрялись в рамках выполнения отчёта по теме «Программа пневмоиспытаний на Яковлевском месторождении» договор №9000111689 (20 116у) от 08.09.2020 г. и дополнительное соглашение № 1 к договору № 9000111689 (20 116у) от 01.01.2022 г.

Председатель комиссии

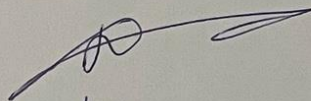
Директор по проектированию
горных работ



Д.В. Климов

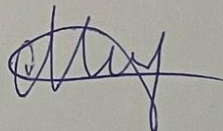
Члены комиссии:

Главный инженер проектов



В.Ю. Демин

Начальник ЦГТШС



Д.П. Мирончук

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Графики сопоставления модельных и натурных напоров

По оси абсцисс – фактические напоры., по оси ординат – модельные напоры (при калибровке).

