

На правах рукописи



Ефремов Евгений Юрьевич

**МЕТОДЫ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ
ОСУШЕНИЯ СИСТЕМЫ «ВОДОВМЕЩАЮЩИЕ ОТЛОЖЕНИЯ -
ДЕЗИНТЕГРИРОВАННЫЙ МАССИВ» (НА ПРИМЕРЕ
СОКОЛОВСКО-САРБАЙСКОЙ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ)**

Специальность 1.6.6. Гидрогеология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГД УрО РАН)

Научный руководитель: **Рыбников Пётр Андреевич**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты: **Тагильцев Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Батрак Глеб Игоревич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Гидрогеоэкологии ФГБУН Института Геоэкологии им. Сергеева РАН, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь

Защита диссертации состоится “29” сентября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.04 при Тюменском индустриальном университете (ТИУ), по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 56, Институт геологии и нефтегазодобычи, аудитория 113.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ФГБОУ «Тюменский индустриальный университет» www.tyuiu.ru и в библиотечно-информационном центре по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72.

Отзывы, заверенные печатью учреждения, в двух экземплярах просим направлять по адресу 625000, г. Тюмень, ул. Володарского 38, Тюменский индустриальный университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.419.04, Семеновой Татьяне Владимировне. Факс 8 (3452) 39-03-46, e-mail: semenovativ@tyuiu.ru. Автореферат диссертации разослан “17” августа 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.419.04, кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Семенова
Татьяна Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Сочетание геологических и горнотехнических факторов при добыче полезных ископаемых может приводить к формированию сложных гидрогеологических условий, представляющих угрозу для горного производства.

Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения гидродинамической системы “дезинтегрированный массив – водовмещающие отложения” и совершенствования методов обоснования систем осушения при разработке рудных месторождений полезных ископаемых для обеспечения безопасности горных работ.

Степень разработанности. В классических работах по горнопромышленной гидрогеологии В. А. Мироненко (1966, 1976, 1980, 1986, 1989, 1999), В. Д. Бабушкина (1969), Ю. А. Норватова (1976, 1988, 2007), В. Г. Румынина (1980, 1989, 1999), А. М. Гальперина (2009) Л. Л. Бокия (1987, 1988) Ф. П. Стрельского (1984, 1988) и др. описаны закономерности формирования зоны водопрводящих трещин и зоны обрушения вокруг очистных выработок. Эти техногенно-нарушенные области массива характеризуются повышенной водопрводимостью и емкостными свойствами и представляют серьезную опасность прорывов подземных вод и обводнённых песчаных и глинистых пород. Размеры изученных и описанных зон составляют десятки метров и, как правило, не нарушают сплошность лежащих выше мощных водоупорных слоев.

Современная практика подземной разработки крутопадающих мощных рудных тел системами с массовым обрушением приводит к появлению обширных зон обрушения. Они проявляются на земной поверхности в форме воронок и провалов, линейные размеры которых составляют тысячи метров.

Образование масштабных провалов сопровождается нарушением всех вышележащих мощных водоупорных слоев и приводит к формированию новых техногенных водоносных комплексов, которые являются источником опасности для горного производства. Прорывы обводненных пльвунообразных пород из зоны обрушения объемом десятки и сотни тысяч кубических метров угрожают жизни людей, выводят из строя километры горных выработок, приводят к списаниям в качестве потерь миллионов тонн полезных ископаемых.

В качестве **объекта исследований** рассматривается Соколовское месторождение, относящееся к крупнейшему в Республике Казахстан Кустанайскому железорудному району. Месторождение расположено в Тобольском артезианском бассейне, эксплуатируется открытым способом с 1957 г., подземным с 1975 г. Месторождение является хорошо изученным, за годы разведки и эксплуатации накоплено большое количество данных: материалов геолого-разведочных работ на железные руды, оценки запасов подземных вод (в 1988 г. разработана региональная геофильтрационная модель, В. В. Веселов, Т. Т. Махмутов, М. Б. Едигенов и др.), обоснования подземной отработки Сарбайского месторождения (в 2012 г. ИГД УрО РАН разработана региональная

геофильтрационная модель), материалов наблюдений рудничных служб за уровнями подземных вод и водопритоками к подземным выработкам, мониторинг аварий и других материалов.

Цель работы: изучение фильтрационных закономерностей в системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения” железорудного месторождения с учётом морфологии водоносных комплексов для управления гидродинамической ситуацией, осушения дезинтегрированного массива и повышения безопасности горных работ.

Задачи исследований:

1. Анализ геомеханических, инженерно-геологических и гидрогеологических подходов и методов исследования прорывов обводнённых масс из зоны обрушения в горные выработки, направленных на оценку опасности аварий, прогноз их развития и разработку методов снижения негативного воздействия.
2. Анализ гидрогеологических условий Соколовско-Сарбайского района, сформированных под влиянием многолетнего водоотлива, и закономерностей образования дезинтегрированного массива.
3. Создание базы данных мониторинга прорывов. Анализ влияния прорывающихся обводненных пластичных масс на процесс добычи и разработка классификации прорывов глинистых пород из зоны обрушения в горные выработки.
4. Разработка концепции водопонижения, учитывающей особенности геологического строения и последствия геомеханических процессов; разработка геофильтрационной модели, включающей не только систему водоносных комплексов и комплексов, но также и дезинтегрированный массив зоны обрушения.
5. Выявление закономерностей влияния фильтрационных и емкостных свойств дезинтегрированного массива в зоне обрушения на закономерности формирования водопритока к горным выработкам.
6. Обоснование технологии и мероприятий по осушению дезинтегрированного массива на основе натуральных данных и математического моделирования, включая оценку необходимой продолжительности работы системы дренажа, определение ее конфигурации и производительности, обеспечивающих снижение уровня в эоцен-меловом водоносном комплексе до целевого уровня на основе сценарных исследований.
7. Разработка методики обоснования осушительных мероприятий, учитывающих особенности морфологии водоносных комплексов и параметры дезинтегрированного массива зоны обрушения.

Научная новизна работы:

1. Предложена классификация прорывов пластичных глинистых пород из зоны обрушения на основе данных об объеме пород, проникающих в горные выработки, и степени влияния прорыва на процесс добычи руды.

2. Разработана концептуальная геофильтрационная модель многопластовой водоносной системы, включающей естественно залегающие горные породы и обособленный гидрогеологический элемент – дезинтегрированный массив зоны обрушения.

3. Разработана геофильтрационная модель Соколовско-Сарбайской рудной зоны. Модель включает основные (эоцен-меловой и палеозойский) водоносные комплексы, внешние (река Тобол, приток со стороны водораздела) и внутренние (дренажные устройства Соколовского и Сарбайского месторождений) граничные условия. Имитирован открытый дренаж эоцен-мелового и палеозойского водоносных комплексов карьеров Соколовский и Сарбайский, а также приток к дренажному кольцу (внешний дренаж) и очистным выработкам (внутренний дренаж) ш. «Соколовской». Модель откалибрована на данных мониторинга притоков к дренажным устройствам и режимных наблюдений на Соколовском и Сарбайском месторождениях.

4. Установлена зависимость между притоками к подземным выработкам и фильтрационными свойствами дезинтегрированного массива зоны обрушения.

6. Показано, что внешний дренажный контур ш. «Соколовская» не обеспечивает достаточного осушения эоцен-мелового комплекса для нарушения гидравлической связи с зоной обрушения.

5. Разработана методика опережающего водопонижения, направленная на нарушение гидравлической связи между эоцен-меловым водоносным комплексом и зоной обрушения с учетом локальной морфологии подошвы водовмещающих отложений для предотвращения прорывы вод и обводненных пластичных пород в горные выработки, реализованная на примере Соколовского железорудного месторождения.

Теоретическая значимость работы заключается в предложенной геофильтрационной модели системы “водовмещающие отложения – дезинтегрированный массив”, в которой зона обрушения подземного рудника имитируется обособленным гидрогеологическим элементом, в основании которого располагается граничное условие третьего рода, реализации модели в виде геогидродинамической модели Соколовско-Сарбайской рудной зоны и определении закономерностей геофильтрационного режима в зоне обрушения.

Практическая значимость заключается в обосновании эффективной системы осушения, обеспечивающей повышение безопасности горных работ на Соколовском месторождении, особенностью которой является учет морфологии водоносного комплекса и выделение точек, в которых размещение водопонизительных скважин позволяет обеспечить максимальный дренажный эффект. Разработанные приемы могут быть применены на других месторождения со схожими условиями.

Методология и методы исследований. Исследования базируются на комплексном анализе геологических, гидрогеологических и горнотехнических условий разработки Соколовско-Сарбайской рудной зоны, с применением статистических и

геостатистических методов обработки данных, а также на решении прямых и обратных задач геофильтрационного численного моделирования.

Личный вклад автора заключается в изучении условий формирования дезинтегрированного массива, анализе закономерностей распределения прорывов на Соколовском месторождении, разработке классификации прорывов с учетом влияния воздействия прорывающихся обводненных пластичных масс на процесс добычи, в анализе гидрогеологических условий, параметров и обосновании особенностей фильтрации подземных вод в водоносных горизонтах и комплексах, а также в дезинтегрированном массиве зоны обрушения Соколовского месторождения, в разработке концептуальной геофильтрационной модели многопластовой водоносной системы Соколовского месторождения, создании и калибровки геофильтрационной модели, в выполнении прогнозных сценарных исследований, в разработке методики обоснования мероприятий по осушению дезинтегрированного массива с учетом закономерностей формирования зоны обрушения и морфологии водоносных комплексов.

Автор 10 лет занимается изучением Соколовского месторождения, принимал участие в разработке мер по борьбе с прорывами обводненных отложений в рамках НИР, в т. ч. являлся автором технологического регламента (2018 г.), ответственным исполнителем НИР (2017 г., 2018 г.), исполнителем в рамках исследований в рамках государственного задания (2014-2021 гг.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Прорывы обводненных пластичных пород из зоны обрушения определяются сочетанием горнотехнических параметров разработки и геологических условий (инженерно-геологических и гидрогеологических). Удельный объем прорвавших обводненных масс увеличивается при сочетании высоких удельных водопритоков, большого объема очистных работ.

2. В гидродинамической системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив” главным фактором, определяющим водоприток, являются фильтрационные свойства основного водоносного комплекса. Высокая проницаемость дезинтегрированного массива не приводит к увеличению водопритока к очистным работам, водопритоки резко сокращаются только при уменьшении коэффициента фильтрации до пороговой величины, составляющей менее 10% от коэффициента фильтрации основного водоносного комплекса.

3. Для обоснования эффективной системы водопонижения для условий разработки железорудных месторождений в областях развития артезианских бассейнов должна использоваться методика, учитывающая фильтрационные и емкостные свойства как водоносных комплексов, так и дезинтегрированного массива зоны обрушения, а также морфологию подошвы водоносных комплексов.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность научных результатов подтверждается данными рудничных служб, наблюдений за уровнями подземных вод, мониторинга аварий, связанных с прорывами, водопритоков к выработкам, материалами оценки запасов подземных вод, а также сходимостью результатов моделирования.

Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 11 публикациях, в том числе 6 в изданиях из списка ВАК.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Область исследований соответствует специальности 1.6.6. Гидрогеология (геолого-минералогические науки) в части пунктов: пункт 1 – Закономерности формирования ресурсов и режима подземных вод; пункт 4 – Теоретические модели геофильтрационных и геомиграционных процессов: методы оценки параметров этих моделей и моделирования; пункт 5 – Изменение гидрогеологических условий в результате инженерной, сельскохозяйственной и коммунальной деятельности человека; пункт 6 – Исследование природно-технических систем, связанных с подземными водами.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 137 страницах текста. Она содержит 8 таблиц, 55 рисунков и список литературы из 114 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность первому научному руководителю, профессору, д.т.н. Сашурину А. Д. и хранит светлую память за приём в научную среду, мудрость, поддержку и помощь в определении направления. Автор глубоко благодарен научному руководителю к.г.-м.н. Рыбникову П. А. за руководство, помощь и ценные советы при написании работы. Автор выражает особую признательность д.г.-м.н. Рыбниковой Л. С. за внимание и существенный методический вклад в формирование работы. Автор весьма благодарен Менгелю Д. А., сотруднику АО “ССГПО” за значительную помощь и поддержку. Автор благодарен коллегам из ИГД УрО РАН за совместную работу, обсуждения и советы. Автор искренне благодарит супругу Юлию за терпение и поддержку на протяжении всего периода написания работы.

Содержание работы

В первой главе рассматривается проблема прорывов обводненных пластичных масс из зоны обрушения. Дается обзор литературы, посвященной прорывам, их последствиям и методам обеспечения безопасности работ на опасных месторождениях. Классифицируются методы изучения прорывов и производится постановка задач исследования.

Во второй главе рассматриваются условия Соколовского железорудного скарнового месторождения, разрабатываемого комбинированным способом - шахтой “Соколовская” и карьером “Соколовский”. В главе рассматриваются

гидрогеологические условия месторождения, устройство дренажной системы, совокупность факторов, приводящих к прорывам обводнённых пластичных пород, феноменология прорывов.

Третья глава посвящена геофильтрационному моделированию. Рассматривается концептуальная модель фильтрации в системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения” и ее воплощение на примере Соколовского месторождения.

В четвертой главе предложена методика обоснования дренажных мероприятий с учетом влияния характеристик дезинтегрированного массива зоны обрушения, приведены прогнозные решения на основе геофильтрационной модели, обосновывающие дренажные мероприятия с учетом локальной морфологии подошвы комплекса.

Проблема прорывов глинистых отложений на Соколовском месторождении.

Соколовское железорудное месторождение расположено в г. Рудный, Республика Казахстан, входит в состав Кустанайского железорудного района, одного из крупнейших в Евразии, содержащего 85 % запасов железных руд страны. Соколовское месторождение вместе с расположенным в шести километрах от него Сарбайским месторождением образуют Соколовско-Сарбайский железорудный комплекс. Оба месторождения относятся к скарновому типу, имеют схожее строение, в результате многолетнего водоотлива сформировалась единая депрессионная воронка радиусом 10 км.

Добыча на Соколовском месторождении ведется комбинированным способом: большая, южная часть разрабатывается карьером Соколовский, северный участок ш. “Соколовская” – системой с обрушением кровли. Месторождение приурочено к соколовской свите каменноугольного периода (В. И. Терновой, 1979). Основные рудные тела залегают на глубине от 200 м и прослежены до 1200 м. Месторождение перекрыто мезо-кайнозойскими отложениями мощностью 120 м, в которых выделяется высоко водообильный эоцен-меловой водоносный комплекс. Для его осушения оба участка месторождения окружены по периметру объединенным внешним дренажным контуром на горизонте +33 м, который состоит из подземных выработок, пройденных в палеозойских породах и оборудованных восстающими скважинами и сквозными фильтрами для дренирования эоцен-мелового водоносного комплекса. Внутренний шахтный дренаж включает все горные выработки и дренажные и разведочные скважины, дренирующие главным образом палеозойский комплекс и зону обрушения.

Добыча руды ш. “Соколовской” привела к формированию зоны обрушения размерами около 1500 м в длину и 600 м в ширину, ориентированную субмеридионально. Формирование зоны обрушения началось в 1981 г. Еще во время разработки месторождения с закладкой выработанного пространства до 1998 г. на поверхности появилось 25 воронок от выемочных единиц первых горизонтов. К

настоящему времени на поверхность вышло более 100 воронок обрушения, многие из которых выходили повторно в уже сформированные провалы.

Зона обрушения состоит из четырех групп, объединяющих отдельные трубообразные воронки, а ее форма определяется конфигурацией рудных тел. В результате массовой добычи при отработке крутопадающих рудных тел (к текущему моменту отработанная мощность составляет 360 м при глубине очистных работ 550 м), обрушенные осадочные горные породы - пески, суглинки и глины, многократно перемешанные между собой и скальными породами, оказались расположены ниже основного водоносного комплекса. Наличие в составе дезинтегрированного массива большого объема глинистых пластичных пород и приток подземных вод из эоцен-мелового водоносного комплекса приводит к прорывам глинистых отложений на горизонты выпуска.

Примером может служить авария 2005 г. При прорыве вод в горные выработки на глубину 400–600 м попало более 150 тыс. м³ воды и 35 тыс. м³ перемешанных осадочных пород. Авария сопровождалась двумя человеческими жертвами. Смесью воды и глины было затоплено более 24 тыс. пог. м. выработок на пяти горизонтах. Восстановление работоспособности рудника заняло более шести месяцев.

Анализ базы данных, содержащей свыше 250 событий, связанных с прорывами обводненных пород из зоны обрушения на ш. “Соколовская”, позволил на основе систематизации, разработанной классификации, анализа временного и пространственного распределения прорывов определить, что:

1) большая часть крупных прорывов обводненных отложений локализуется в нескольких рудных блоках, расположенных на центральном и северном участках рудного поля.

2) выделяются две группы рудных тел и соответствующих им зон обрушения: рудные тела, разрабатывающиеся в течение длительного времени, в пределах которых с увеличением удельного объема водопритоков в рудном блоке увеличивается удельный объем прорывов из зоны обрушения; рудные тела с относительно непродолжительной разработкой, в пределах которых взаимосвязь между объемом водопритока и объемами прорывов не прослеживается.

Первое защищаемое положение:

Прорывы обводненных пластичных пород из зоны обрушения определяются сочетанием горнотехнических параметров разработки и геологических условий (инженерно-геологических и гидрогеологических). Удельный объем прорвавших обводненных масс увеличивается при сочетании высоких удельных водопритоков, большого объема очистных работ.

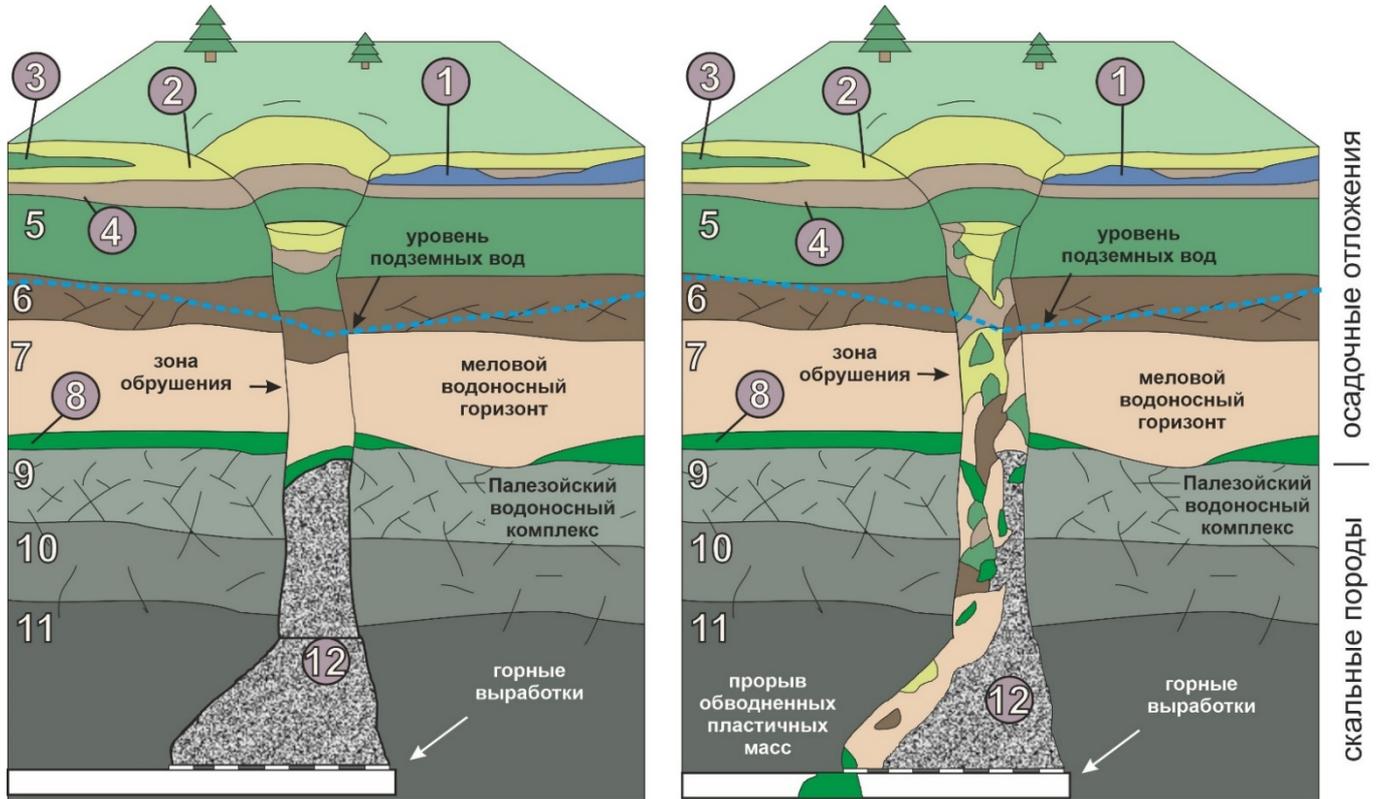
Зона обрушения – область массива, которая формируется над выработанным очистным пространством вследствие разрушения пород кровли под собственным весом или принудительно. Если процесс обрушения затрагивает земную поверхность,

происходит образование провалов и воронок обрушения. Исходя из понятия *прорывов обводненных масс из зоны обрушения* наличие *зоны обрушения* является необходимым условием, классифицирующим рассматриваемое явление. Развитие зоны обрушения определяется несколькими факторами: геометрическими параметрами (площадью и высотой) рудных тел, физико-механическими свойствами пород кровли залежи и технологией ведения горных работ (системой разработки, методами управления кровлей). Особенно важным является сочетание таких факторов, как устойчивость пород кровли и пространственные размеры очистных работ (D. H. Laubsher, 1995); И. Д. Ривкин, 1969).

Однако само по себе образование зоны обрушения еще не приводит к опасности прорывов. Необходимым фактором их появления является наличие *прорывоопасных пород*. Под этим термином понимаются грунты, обладающие специфическими параметрами (дисперсность, пластичность, текучесть, тиксотропность и др.), необходимыми для формирования прорывов.

Внутри зоны обрушения под влиянием горных работ происходит сначала частичное смещение водоносных и водоупорных слоев (рисунок 1 а). В дальнейшем при продолжении горных работ во время отработки крупных рудных тел происходит полное перемешивание пород, в т.ч. прорывоопасных внутри канала обрушения (рисунок 1 б). Эксперименты показывают (Д. М. Казикаев, 1978), что внутри зоны обрушения распределение плотности пород крайне неоднородно: создается множество разреженных участков и полостей, которые легко заполняются обводненными породами и формируют каналы поступления обводненных пластичных пород практически на любую глубину разработки.

Другим необходимым фактором является наличие *источника прорывающихся вод*. Источником вод прорыва могут быть как подземные воды – водоносные горизонты, карст, так и поверхностные воды. В определенных условиях, для формирования прорывов из зоны обрушения, достаточно водопритоков, возникающих вследствие обильных осадков.



а)

б)

Рисунок 1 – Схема формирования условий прорывов обводненных масс из зоны обрушения: а – начальная стадия образования зоны обрушения, б – конечная стадия развития зоны обрушения, сформированными условиями для прорывов.

Цифрами обозначены: 1) супеси четвертичные, 2) суглинки четвертичные, 3) пески четвертичные, 4) пески олигоценовые, 5) глины чеганские, 6) опоки эоценовые, 7) меловые пески, 8) кора выветривания палеозойских пород, 9) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) высокой трещиноватости, 10) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) средней трещиноватости, 11) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) низкой трещиноватости, 12) дезинтегрированный массив зоны обрушения.

По сравнению с зоной водопроводящих трещин (ЗВТ), которая характеризуется нарушением водозащитной толщи, но относительно слабой гидравлической связью с вышележащими водоносными комплексами, зона обрушения характеризуется практически неограниченной водопроводимостью (В.А. Мироненко и др., 1989). Современные системы разработки мощных крутопадающих рудных тел приводят к появлению обширных провалов и воронок обрушения. Их образование сопровождается разрушением водоупорных слоев на всем протяжении области воронкообразования и формированием техногенных водоносных комплексов в пределах области дезинтегрированного массива.

Еще одной группой факторов, влияющих на появление прорывов, являются *параметры технологии горных работ* (очередность отработки, равномерность выпуска, форма выпускающих отверстий и др.), благодаря которым риски прорывов могут как снижаться, так и возрастать.

Из анализа приведённых выше факторов видно, что все из них являются необходимыми для формирования прорывов из зоны обрушения. Отсюда следует первое защищаемое положение.

Второе защищаемое положение

В гидродинамической системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив” главным фактором, определяющим водоприток, являются фильтрационные свойства основного водоносного комплекса. Высокая проницаемость дезинтегрированного массива не приводит к увеличению водопритока к очистным работам, водопритоки резко сокращаются только при уменьшении коэффициента фильтрации до пороговой величины, составляющей менее 10% от коэффициента фильтрации основного водоносного комплекса.

Изучение режимов фильтрации геогидродинамической системы “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив” осуществлялось с помощью моделирования. Цель моделирования – установление закономерностей между фильтрационными свойствами дезинтегрированного массива и водопритоками к очистным работам ш. «Соколовская».

На первом этапе моделирования решена серия обратных задач в стационарной постановке, соответствующая текущему состоянию подземных работ (2007–2018 гг.) с целью калибрации модели.

Концептуальная фильтрационная модель зоны обрушения

Для моделирования фильтрационных процессов в системе “естественный массив – дезинтегрированный массив зоны обрушения” зона обрушения рассматривается как отдельный гидрогеологический элемент со своими фильтрационными и емкостными параметрами, подошва которого представляет собой дренаж. В качестве отметки дрены используется комплекс очистных работ, а проводимость дрены определяется путем решения обратных задач с использованием данных наблюдений за шахтным водоотливом.

Стратификация модели

Участок моделирования включает карьеры “Соколовский”, “Сарбайский”, а также ш. “Соколовская”. С юга участок ограничен р. Тобол (Рисунок 2). В плане элементы конечно-разностной сетки имеют квадратную форму со стороной 200 м, по высоте соответствуют мощности моделируемых слоев. В непосредственной близости от исследуемого объекта реализовано сгущение расчетной сети с целью более тонкого учета рельефа элементов залегания эоцен-мелового водоносного комплекса. Размер элемента сети сгущения – 50 м.

Наличие слоя чеганских глин мощностью до 35 м, являющегося региональным водоупором, обуславливает разделение режимов эоцен-мелового и олигоцен-четвертичного комплексов. В естественных условиях уровни подземных вод

различались между собой не более чем на 20 м. В результате работы рудничного дренажа уровень подземных вод эоцен-мелового комплекса снизился с 165 м до 95 м, в то время как уровень подземных вод олигоцен-четвертичного комплекса почти не изменился и по-прежнему составляет 175 м. Данные режимных наблюдений на карьерах Сарбайский и Соколовский показывают, что приток к их дренажным системам из олигоцен-четвертичного комплекса не превышает 15 % от общего водопритока. Эоцен-меловой комплекс обеспечивает 70 % водопритока, еще 15 % поступает из палеозойского водоносного комплекса, гидравлически связанного с эоцен-меловым.

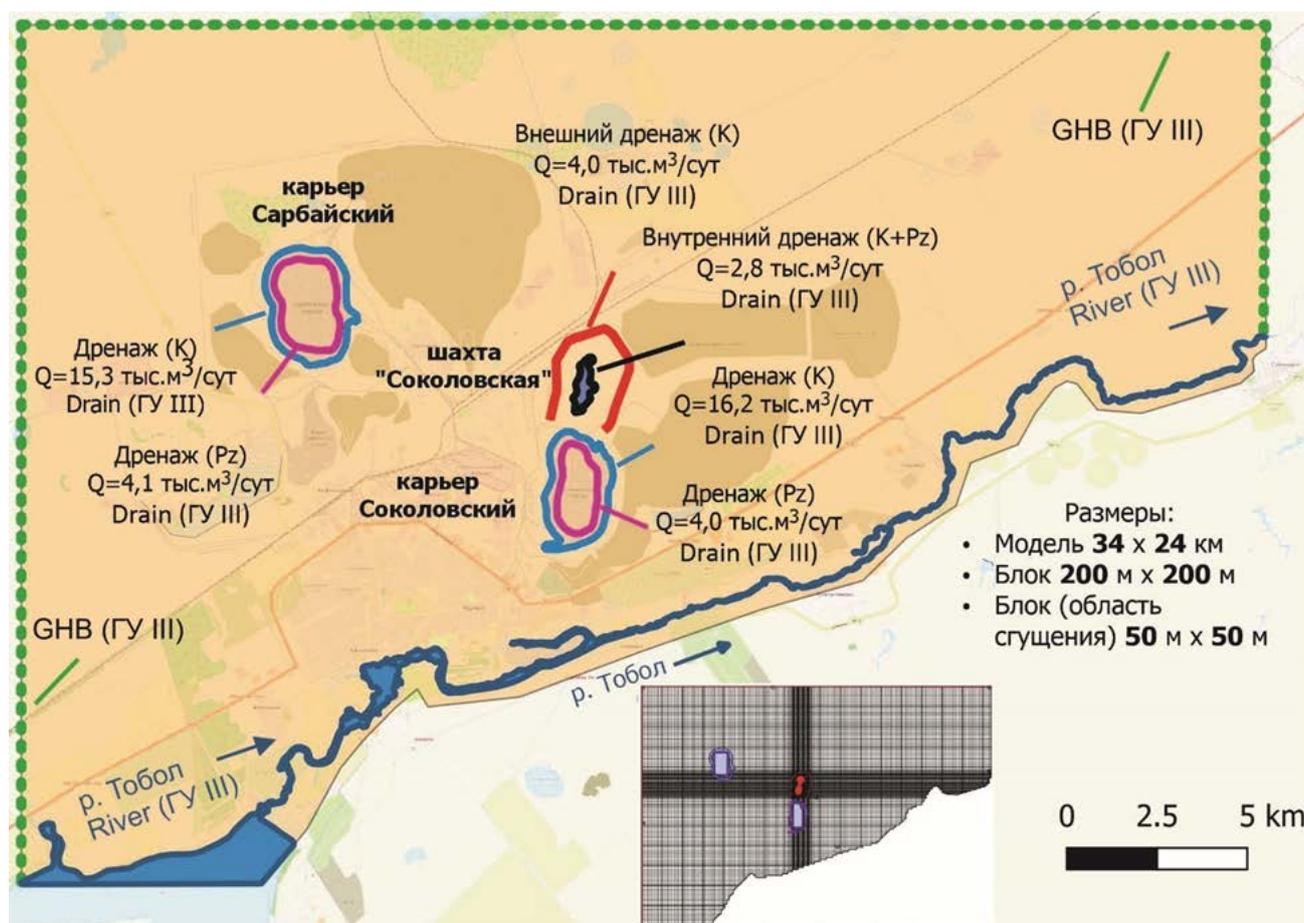


Рисунок 2 – Схема геофильтрационной модели района Соколовско-Сарбайского железорудного комплекса. Q – расход дренажа, тыс. м³/сут, K – эоцен-меловой водоносный комплекс, Pz – палеозойский водоносный комплекс. Зона обрушения на рисунке совпадает с внутренним дренажем.

Отсутствие связи между олигоцен-четвертичным и нижележащими комплексами, а также его подчиненная роль в общем водопритоке позволяет исключить его из модели. Модель включает эоцен-меловой и палеозойский водоносный комплексы, разделенные водоупорным слоем коры выветривания (Рисунок 3).

При оценке запасов (В.В. Веселов и др., 1992; М.Б. Едигенов, 1990) дренажных подземных вод было показано, что в пределах исследуемой области наблюдается значительный разброс фильтрационных свойств эоцен-мелового водоносного комплекса. Коэффициент фильтрации достигает максимальных значений вплоть до 15-

20 м/сут в долине Тобола. По материалам опытно-фильтрационных работ в районе Соколовского и Сарбайского месторождений величина коэффициента фильтрации меловых песков составляет 1–5 м/сут.

H, м	Литология	Возраст и литологический состав	Индекс	m, м	k, м/сут	Характеристика	Стратификация модели
+185 +180		Неоген-четвертичные (пески, супеси)	N+Q	3 - 15	0,1 - 1,0	Верхний водоносный комплекс	
+175							
		Олигоценые (пески)	N+Q	2 - 8	1,0 - 3,0		
+150		Чеганские (глины)	P ₂ ³	10 - 35	0,0001	Региональный водоупор	
+110		Эоценовые (опоки, глины)	P ₂ ²	20 - 35	0,5	Нижний водоносный комплекс	Водоносный Слой №1
		Меловые (пески)	K ₂	30 - 45	0,7 - 6,0		
+80 +70		Коры выветривания (глины)	al Pz	5 - 12	0,0005		Водоупорный Слой №2
+20		Палеозойские (сильно трещиноватые: базальты, туфы и др.)	al Pz	50	0,085		Водоносный Слой №3
-30		Палеозойские (сильно трещиноватые: базальты, туфы и др.)	al Pz	50	0,005	Водоносный Слой №4	

Рисунок 3 – Стратификация и характеристики фильтрационной модели. *H* – абсолютные отметки, *m* – мощность, *k* – коэффициент фильтрации

Фильтрационные свойства палеозойских пород обладают четко выраженной вертикальной зональностью, комплекс представлен двумя модельными слоями: верхний (слой 3) соответствует зоне сильно трещиноватых пород, второй, нижележащий (слой 4) – менее нарушенной зоне (рисунок 3).

Граничные условия

Внешние границы модели представлены границами III рода через соответствующее фильтрационное сопротивление на расстоянии, которое не противоречит рассматриваемому процессу осушения водоносных комплексов и позволяет учитывать расширение области депрессии в процессе осушения водоносных комплексов. Р. Тобол, расположенная на юге моделируемой области), моделировались с помощью граничного условия III рода, параметры сопротивления донных отложений определялись в процессе калибровки модели.

Приток подземных вод к горным выработкам моделировался с помощью граничного условия третьего рода – дрены (Рисунок 2). Глубина их заложения соответствует отметкам прибортовых дренажей водоносных комплексов для карьеров, глубине очистных работ для зоны обрушения, отметкам подошвы эоцен-мелового водоносного комплекса для внешнего дренажного комплекса ш. «Соколовская». Параметры сопротивления дрен подбирались в процессе калибровки модели.

Решение обратных задач

Исходными неизменными параметрами модели служили морфология и фильтрационные свойства моделируемых слоев, геометрические элементы модели и расчетной сетки и положение основных водотоков.

В процессе моделирования уточнялись параметры граничных условий и фильтрационные свойства области дезинтегрированного массива зоны обрушения ш. «Соколовской». Критериями сходимости модели выступали: совпадение модельных и фактических среднегодовых притоков к дренажным устройствам и уровней подземных вод вблизи рудного поля ш. «Соколовская». Отклонение модельных притоков к дренажам от наблюдаемых составляет не более 3 %. Отклонение модельных уровней подземных вод вблизи зоны обрушения составляет около 1 м.

Для оценки влияния фильтрационных параметров зоны обрушения на приток к внутреннему контуру решена серия прямых задач гидродинамического моделирования. Исследовалось влияние коэффициента фильтрации дезинтегрированного массива в зоне обрушения на изменение водопритока к зоне обрушения. Фильтрационное сопротивление дрен оставалось постоянным. Рассматривался диапазон от уменьшенных в 10 раз, до увеличенных в 10 раз значений параметра фильтрации меловых песков в области ш. «Соколовская». (Рисунок 4).

Высокие фильтрационные свойства дезинтегрированного массива (относительно основных водоносных комплексов) не влияют на значения водопритоков к очистным работам (внутреннему дренажному контуру), низкие фильтрационные свойства (в десять раз ниже основного комплекса) приводят к значительному снижению притока к дренажной системе. Соответственно, основным фактором, определяющим водоприток, являются фильтрационные свойства эоцен-мелового комплекса.

Отметка уровня подземных вод эоцен-мелового комплекса в области рудного поля составляет в среднем 95 м. В эоцен-меловом водоносном комплексе по периметру зоны обрушения сохраняются остаточные столбы высотой около 5–15 м, сохраняется питание дезинтегрированного массива водами эоцен-мелового комплекса. Это обусловлено *неоптимальным расположением* внешнего дренажного контура относительно *морфологических особенностей* эоцен-мелового комплекса (Рисунок 5).

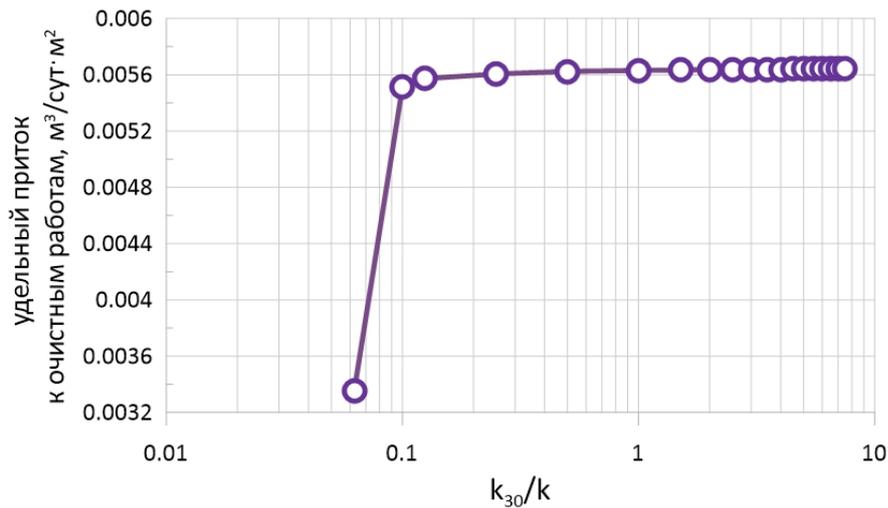


Рисунок 4 – Зависимость притоков к очистным работам от коэффициента фильтрации массива зоны обрушения.

k_{30} – коэффициент фильтрации зоны обрушения, k – коэффициент фильтрации естественно залегающих отложений эоцен-мелового комплекса

В окрестностях рудного поля подошва комплекса имеет сложный изрезанный характер рельефа. Имеются многочисленные возвышенности и впадины, а разброс отметок подошвы комплекса достигает 30 м. Несмотря на работу дренажа, положение уровня подземных вод обеспечивает значительный приток к зоне обрушения, который поступает через седловидные понижения между локальными повышениями рельефа.

Для нарушения гидравлической связи между эоцен-меловым водоносным комплексом и дезинтегрированным массивом зоны обрушения необходимо снижение уровня подземных вод по периметру шахтного поля до отметок подошвы водоносного комплекса на границе с зоной обрушения. Это позволит создать условия для сработки статических запасов в дезинтегрированном массиве зоны обрушения объемом 4.3 млн м^3 и обеспечить повышение безопасности добычи руды. Отметки целевого уровня водопонижения составляют 82-84 м.

Понижение до этого уровня позволит нарушить гидравлическую связь между эоцен-меловым водоносным комплексом и зоной обрушения и тем самым снизить опасность прорывов обводненных масс в горные выработки.

Третье защищаемое положение:

Для обоснования эффективной системы водопонижения для условий разработки железорудных месторождений в областях развития артезианских бассейнов должна использоваться методика, учитывающая фильтрационные и емкостные свойства как водоносных комплексов, так и дезинтегрированного массива зоны обрушения, а также морфологию подошвы водоносных комплексов.

Установление зависимостей между уровнем подземных вод в эоцен-меловом водоносном комплексе, водопитоками к дренажным устройствам и емкостными параметрами естественной геологической среды и дезинтегрированного массива зоны

2. Водопонижение осуществляется с помощью дополнения к существующему дренажному контуру шести скважин, расход каждой из которых составляет 50 м³/час (1200 м³/сут). Скважины расположены в зонах локальных депрессий рельефа подошвы эоцен-мелового водоносного комплекса между дренажным кольцом и зоной обрушения. Расположение скважин в “низинах” подошвы комплекса обеспечивает положение забоя скважины ниже целевой отметки уровня при водопонижении (82-84 м). Скважины моделируются граничным условием второго рода.

3. Моделируемый временной интервал от начала откачки составляет 720 дней.

4. Определяется темп снижения напоров в области геометрического центра зоны воронкообразования.

5. Темп снижения уровней оценивается для трех прогнозных сценариев (вариантов), которые отличаются значениями упругой емкости определяющих гидрогеологических элементов. Базовый сценарий №2 соответствует достоверным оценкам емкости эоцен-меловых отложений и зоне обрушения (В. В. Веселов, 1992). Пессимистичный сценарий №1 предусматривает повышенную емкость дезинтегрированного массива зоны обрушения. Позитивный сценарий №3 предполагает гравитационное сжатие (переотложение) эоцен-меловых отложений под влиянием многолетнего водоотлива и переотложение дезинтегрированного массива зоны обрушения (Таблица 1).

Значения емкости коры выветривания и палеозойского водоносного комплекса оставались постоянными для всех трех сценариев.

Таблица 1 – Емкостные параметры фильтрационной модели

№	Моделируемый элемент	Упругая ёмкость, д, для вариантов		
		№1	№2	№3
1	Эоцен-меловой водоносный комплекс	1*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵
2	Зона обрушения	1*10 ⁻⁴	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁶
3	Кора выветривания палеозойских пород (водоупор)	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶
4	Верхняя часть трещиноватой зоны палеозойского водоносного комплекса	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶
5	Нижняя часть трещиноватой зоны палеозойского водоносного комплекса	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁻⁶

Результаты моделирования

В результате решения прогнозных фильтрационных задач получены распределения напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, палеозойском водоносном комплексе на начало и конец осушения, а также графики понижения уровня подземных вод.

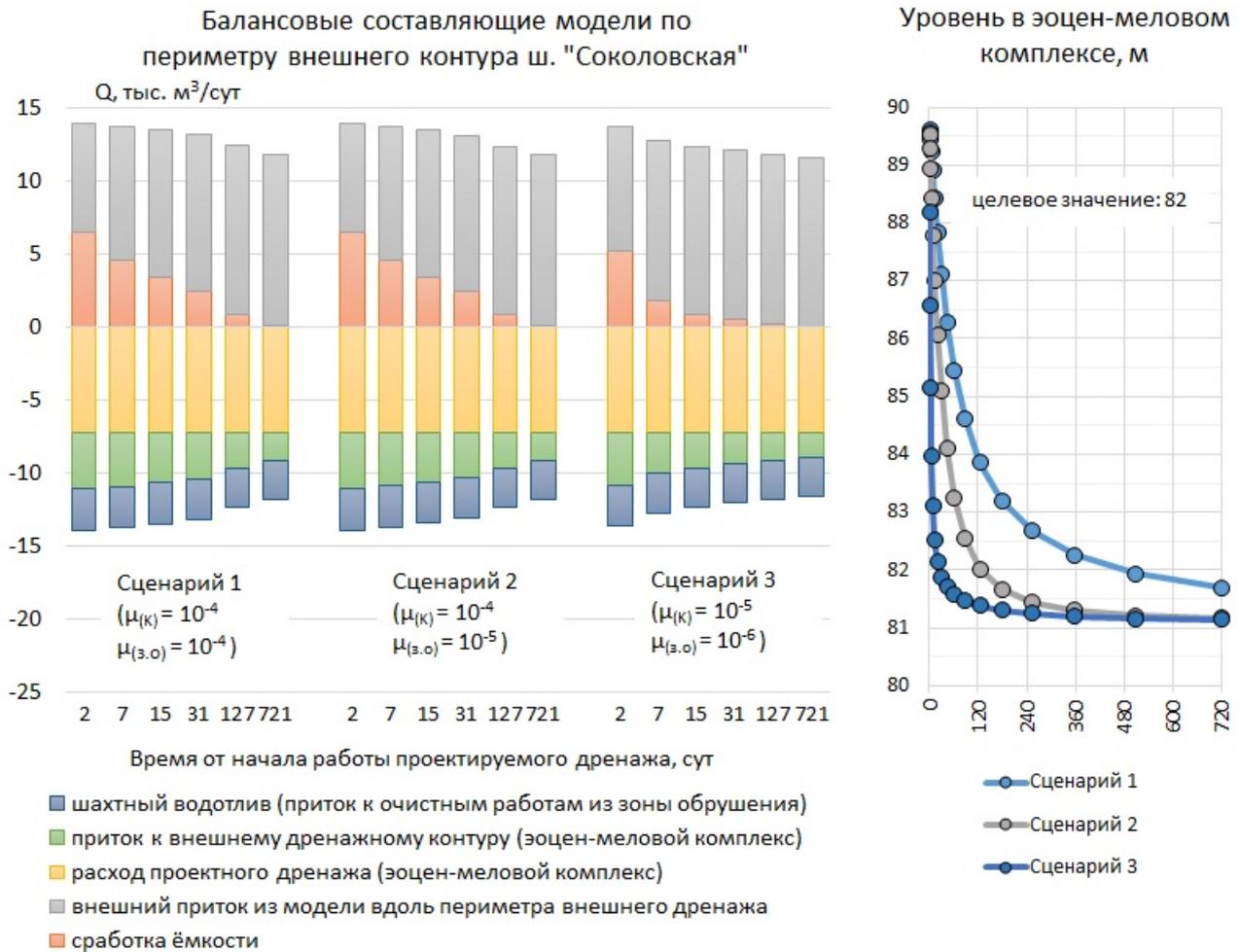


Рисунок 6 – Результаты прогнозного моделирования

Скорость изменения уровня подземных вод значительно зависит от емкостных показателей эоцен-меловых песков и дезинтегрированного массива. Из графиков снижения уровней в геометрическом центре зоны обрушения видно, что при осушении эоцен-мелового водоносного комплекса поля шестью скважинами с общим расходом 7200 м³/сут снижение уровней до целевого показателя происходит менее чем за два года от начала откачки, даже при худшем варианте №1 (Рисунок 6).

Установлено, что при дренаже эоцен-мелового комплекса на северном фланге Соколовского месторождения снижение уровня вод эоцен-мелового комплекса до отметки подошвы комплекса (82 м) достигается не позднее чем 510 суток.

Методика обоснования дренажа зоны обрушения

Проведенные исследования позволили разработать методику обоснования осушения зоны обрушения для борьбы с прорывами обводненных пород. Методика позволяет принимать инженерные решения по осушению месторождений, разрабатываемые системами разработки с обрушением кровли: системы с блочным обрушением (block caving mining method) и с этажным обрушением (sublevel mining method). Суть методики сводится к положениям, изложенным на рисунке 7.



Рисунок 7 – Методика обоснования дренажа дезинтегрированного массива зоны обрушения.

Методика базируется на оценке фильтрационных и емкостных параметров дезинтегрированного массива зоны обрушения и окружающих пород с помощью моделирования фильтрационных процессов в нестационарной постановке.

Заключение

В работе исследованы гидрогеодинамические условия системы дезинтегрированный массив зоны обрушения – естественная геологическая среда, которые формируются комплексом гидрогеологических и горнотехнических условий при отработке рудных месторождений системами с обрушением. Работа проведена с целью обоснования методики опережающего водопонижения для предотвращения прорывов воды и обводненных пластичных пород в горные выработки на примере Соколовского железорудного месторождения.

Предложена концептуальная геофильтрационная модель системы “дезинтегрированный массив зоны обрушения – естественная геологическая среда” для описания процессов фильтрации и обоснования дренажных мероприятий.

Разработана и откалибрована геофильтрационная модель Соколовско-Сарбайской рудной зоны, включающая эоцен-меловой и палеозойский водоносный

комплексы с внешними граничными условиями, моделирующими реку Тобол и приток со стороны водораздела, и внутренними условиями, моделирующими водоотлив Соколовского и Сарбайского месторождений. Имитировались открытый дренаж эоцен-мелового и палеозойского водоносных комплексов карьеров “Соколовский” и “Сарбайский”, а также приток к дренажному кольцу и очистным выработкам ш. “Соколовская”. Модель откалибрована по данным мониторинга притоков к дренажным устройствам и режимных наблюдений за уровнями подземных вод в районе Соколовского и Сарбайского месторождений.

На основе натурных данных и сценарных исследований обоснованы мероприятия по осушению дезинтегрированного массива, определена требуемая продолжительность работы, конфигурация и производительность системы дренажа, обеспечивающие снижение напоров до необходимого уровня, что минимизирует опасность прорывов из зоны обрушения.

Разработана методика обоснования дренажных мероприятий для снижения опасности прорывов из зоны обрушения. Отличительными особенностями методики являются учет и оценка влияния фильтрационных и емкостных параметров дезинтегрированного массива в результате решения обратных задач и учет особенностей морфологии подошвы водоносных комплексов для эффективного снижения напоров в дезинтегрированном массиве.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в детализации гидродинамических условий в техногенных водоносных комплексах, формируемых при разработке системами с обрушением кровли с учетом неоднородностей распределения фильтрационных параметров дезинтегрированного массива и окружающих пород.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Ефремов, Е.Ю.** Обоснование критерия завершения процесса воронкообразования / Е.Ю. Ефремов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2018. – № 4. – С.12-22.

2. **Ефремов, Е.Ю.** Характеристика распределения прорывов песчано-глинистых отложений из области обрушения в условиях месторождения, покрытого осадочным чехлом / Е.Ю. Ефремов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 12. – С.126-134.

3. **Ефремов, Е. Ю.** Определение безопасных условий отвалообразования на земной поверхности в зоне обрушения действующего подземного рудника / Е.Ю. Ефремов, Д.Е. Мельник. – DOI: 10.17580/gzh.2020.02.11 // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С. 75-79.

4. **Ефремов, Е.Ю.** Оценка состояния и мониторинг процесса воронкообразования при подземной разработке системами с блочным обрушением / Е.Ю. Ефремов, Д.В. Дорохов. – DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2604 // Известия Томского

политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 4. – С.170-178.

5. **Ефремов, Е.Ю.** Анализ источников водного питания прорывов глинистых отложений в горные выработки Соколовского месторождения / Е. Ю. Ефремов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 56-68.

6. **Ефремов, Е. Ю.** Обоснование осушения гидрогеодинамической системы «водовмещающие отложения - дезинтегрированный массив» при подземной разработке железорудных месторождений / Е.Ю. Ефремов, П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова – DOI: 10.17513/use.38015 // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 3. – С. 47-57.

Статьи в научных сборниках, журналах и материалах конференций

1. **Ефремов, Е.Ю.** Особенности переноса осадочных отложений из области обрушения в выработанное пространство на ш. Соколовской / Е.Ю. Ефремов // Горное дело: XI специализированная выставка технологий, оборудования, спецтехники = Ural Mining 18 (МВЦ Екатеринбург - Экспо 7-9.11.2018) : тезисы докладов / Компания Экспоград. – Екатеринбург, 2018. – С. 96-97.

2. **Ефремов, Е.Ю.** Определение условий завершения воронкообразования для рудных месторождений, перекрытых осадочным чехлом / Е.Ю. Ефремов // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сборник докладов VIII международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2019. – С. 209-216.

3. **Ефремов, Е.Ю.** Анализ условий завершения процесса воронкообразования на земной поверхности подземных рудников / Е.Ю. Ефремов // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений : труды VI Международной конференции (10 - 11 апреля 2019). – Екатеринбург : УГГУ, 2019. – С. 223-230.

4. **Ефремов, Е.Ю.** Особенности распределения прорывов глинистых отложений из вышележащих осадочных пород в выработки Соколовского месторождения / Е.Ю. Ефремов // XXI Уральская молодежная научная школа по геофизике : сборник научных материалов, (г. Екатеринбург с 23 по 27 марта 2020 г.). – Екатеринбург : ИГФ УрО РАН, 2020. – С. 59-63.

5. Рыбникова, Л.С. Оценка влияния коэффициента фильтрации зоны дезинтегрированного массива зоны обрушения на рудничный водоприток с помощью моделирования / Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, **Е.Ю. Ефремов** // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. (30-31 марта 2023 г.). – Москва : Издательство «Геоинфо», 2023. – Вып. 24. – С. 252-255.