

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук

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.

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
канд. геол.-минерал. наук,
Рыбников П. А.

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Прорывы обводненных масс в горные выработки. Проблема, история исследований, меры борьбы.....	13
1.1 Прорывы обводненных масс из зоны обрушения и безопасность горных работ	13
1.2 Сведения о прорывах обводненных масс	16
1.2.1 Аварии на кимберлитовых месторождениях	17
1.2.2. Прорывы на угольных месторождениях.....	20
1.2.3. Аварии на рудных месторождениях	22
1.3 Состояние вопроса о прорывах обводненных масс.....	24
1.3.1 Работы в области проектирования, геомеханики и дренажа рудных месторождений	26
1.3.3 Физико-механические свойства обводненных глинистых и песчаных пород, условия возникновения прорывов	29
1.3.2 Исследования в области моделирования прорывов обводненных масс эквивалентными материалами	31
1.3.4 Математические модели фильтрации обводненных масс	34
1.4 Механизм проникновения прорывов в горные выработки.....	36
1.5 Обеспечение безопасности горных работ от прорывов обводненных масс на горных предприятиях.....	39
1.5.1 Прогнозирование прорывов пород в горные выработки	39
1.5.2 Методы борьбы с прорывами	40
1.5 Выводы.....	43

2.	Условия формирования прорывов на Соколовском месторождении...	45
2.1	Характеристика месторождения.....	45
2.1.1	Общая характеристика	45
2.1.2	Гидрогеологические условия месторождения	47
2.1.3	Горно-техническая характеристика	52
2.1.4	Строение системы осушения Соколовского месторождения	53
2.1.5	Распределение фильтрационных потоков к дренажной системе ш. “Соколовская”.....	55
2.2	Характеристика распределения прорывов из зоны обрушения Соколовского месторождения	58
2.2.1	Строение зоны обрушения ш. “Соколовская”	58
2.2.2	Распределение прорывов из зоны обрушения Соколовского месторождения	61
2.3	Выводы.....	68
3.	Моделирование фильтрационных процессов.....	71
3.1	Математическая модель	71
	Основное уравнение фильтрации.....	71
	Граничные условия	73
	Конечно-разностная аппроксимация	76
3.2	Моделирование системы “естественная геологическая среда – дезинтегрированный массив” на Соколовском месторождении.....	80
3.2.1	Задачи моделирования.....	80
3.2.2.	Описание фильтрационной модели	81
3.2.3.	Решение обратных задач	87
3.2.4.	Закономерности изменения фильтрационных параметров	88

3.3 Выводы.....	89
4. Прогноз изменения водопритоков в системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения”	91
4.1 Постановка задачи	91
4.2 Результаты моделирования	94
4.3 Методика обоснования дренажа зоны обрушения	109
4.4 Выводы.....	111
Заключение	113
Список сокращений	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
СПИСОК РИСУНКОВ	117
СПИСОК ТАБЛИЦ.....	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Сочетание геологических и горнотехнических факторов при разработке месторождений полезных ископаемых может приводить к формированию сложных гидрогеологических условий, которые представляют угрозу для горного производства. Одним из самых опасных явлений при подземной добыче являются прорывы подземных вод и обводненных горных пород в горные выработки.

Степень разработанности. В классических работах по горнопромышленной гидрогеологии В. А. Мироненко [1, 2], В. Д. Бабушкина [3], Ю. А. Норватова [4], В. Г. Румынина [5], А. М. Гальперина [6], Л. Л. Бокия [7], Ф. П. Стрельского [8] и др. описаны закономерности формирования зоны водопроницаемых трещин и зоны обрушения вокруг очистных выработок. Эти техногенно-нарушенные области массива характеризуются повышенной водопроницаемостью 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. Под влиянием выпуска руды в области обрушения происходят интенсивные процессы перемешивания скальных и осадочных пород в присутствии подземных вод, что приводит к прорывам обводнённых пластичных масс в горные выработки. Прорывы характерны для крупных месторождений: алмазных кимберлитовых рудников ЮАР, медных рудников Чили и Индонезии, железорудных месторождений и др.

Распространенным последствием прорывов является выход из строя выработок на длительное время. Обводненная пластичная масса плохо поддается расчистке. Даже относительно небольшое количество породы, объемом до 30 м³, может на несколько смен остановить производство.

Крупная авария, объемом несколько тысяч кубических метров, выводит из строя километры галерей и останавливает работу рудника на месяцы. Наиболее серьезным последствием прорывов является временное или окончательное закрытие отдельных участков рудных полей или полностью подземных рудников.

Одна из самых масштабных катастроф произошла в 1970 г. на руднике “Mifulira”, Замбия. Обводненные породы хвостов обогащения, объемом свыше 450 тыс. м³ проникли в горные выработки сквозь обрушенные породы на глубину более километра, во время аварии погибло 89 человек, значительная часть рудника выведена из строя на несколько лет.

Практика показывает, что наиболее действенным методом борьбы с прорывами является осушение зоны обрушения [9]. Осушение месторождений — это дорогостоящий комплекс работ, который должен опираться на обоснованные прогнозы, учитывающие фильтрационные и ёмкостные свойства как окружающей геологической среды, так и дезинтегрированного массива зоны обрушения. Помимо этих факторов, для планирования дренажных мероприятий важно учитывать морфологию водоносных комплексов, т. к. существенные перепады отметок подошвы водоносного комплекса, сложенной водоупорными породами, могут оказывать существенное влияние на направление движения подземных вод.

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.

Цель работы: изучение закономерностей фильтрации 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.

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. [10]), 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.

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 обводнённых 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 и очистным выработкам 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. Обоснована целесообразность и 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 прорывов 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.

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 ёмкостные 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.

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 комплексах 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.).

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;
- 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.

1. ПРОРЫВЫ ОБВОДНЕННЫХ МАСС В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ. ПРОБЛЕМА, ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕРЫ БОРЬБЫ

1.1 Прорывы обводненных масс из зоны обрушения и безопасность горных работ

Системы разработки с обрушением кровли характеризуются высокой продуктивностью и низкими затратами производства по сравнению с другими технологиями подземной добычи [11]. Они широко применяются для разработки крупных месторождений полезных ископаемых, а в ряде случаев являются основной технологией добычи. Применение блочного самообрушения (block saving) безальтернативно в случаях глубокого залегания крупных рудных тел, когда открытые горные работы неприменимы вследствие запредельной стоимости (глубокие комплексы алмазных месторождений) или когда ценность и содержание полезного ископаемого не позволяет применять более дорогостоящие системы с поддержанием выработанного пространства (железорудные или месторождения с малым содержанием полезного компонента) [12, 13]. Однако при разработке системами с обрушением образуется обширная область дезинтегрированного массива над очистным пространством, проявляющаяся на земной поверхности в виде воронок и провалов. При этом процессу разработки сопутствует ряд опасностей, которые необходимо учитывать. Ключевыми из них являются:

1. горные удары и проявления горного давления
2. воздушные удары
3. прорывы обводненных рыхлых пород.

Под прорывами обводненных пород (в англоязычной литературе – mud rush) подразумевается неожиданное появление обводненных пород из зоны обрушения на комплекс выпуска. В основном это залегающие выше породы осадочного происхождения – песок и глина в чистом виде или смешанные в различных пропорциях. Вместе с тем известны случаи прорыва обводненных масс техногенного происхождения – хвостов обогащения.

К этому типу прорывов относится одна из крупнейших аварий в истории горного дела – авария на руднике Mifulira, Замбия. Авария произошла в 1970 г., хвосты обогащения, размещаемые в зоне обрушения, проникли через скальный доломитовый массив на глубину более 1000 м. В горные выработки прорвалось более 450 тыс. куб. м обводненной массы. Последствиями аварии были прекращение добычи меди (до аварии производительностью более 150 тыс. т в год) на долгие месяцы и гибель 89 человек [14].

Одним из характерных последствий прорывов является выход из строя выработок на длительное время. Обводненная пластичная масса плохо поддается расчистке (Рисунок 1.1, Рисунок 1.2, Рисунок 1.3. Даже относительно небольшое количество породы, объемом до 30 куб. м, может на несколько смен остановить производство или вывести из строя выпускающую воронку или отдельную выработку.



Рисунок 1.1 – Последствия прорыва пород на руднике El Teniente, Чили



Рисунок 1.2 – Последствия прорыва пород на ш. «Соколовская», Республика Казахстан



Рисунок 1.3 – Последствия прорыва пород на руднике Dutoitspan, ЮАР, 2015 г.

Помимо объема прорвавшихся пород важную роль играет локализация прорывов в случае, если в области прорыва оказывается одна из ключевых транспортных выработок выпускающего комплекса.

Как показывает практика, крупная авария, объемом несколько тысяч кубов выводит из строя километры горных выработок и останавливает работу рудника на месяцы.

Примером может служить авария 2005 г. на Соколовском месторождении. При прорыве вод в горные выработки на глубину 400 – 600 м, на рабочие комплексы попало более 150 тыс. куб. м. воды и 35 тыс. куб. м. перемешанных осадочных пород. Авария сопровождалась двумя человеческими жертвами. Смесью воды и глины было затоплено более 24 тыс. погонных метров выработок на пяти комплексах. Восстановление работоспособности рудника заняло более шести месяцев [15].

Помимо катастрофических последствий с связанных с гибелью людей и длительному выводу из строя предприятий, меньшие по масштабу проявления тоже наносят значительный ущерб. Отжимы глинистых пород через рудную подушку могут запечатывать выпускающие воронки, выводя из строя блоки руды, объемом в сотни тысяч тонн. В таких случаях приходится списывать запасы с баланса, иногда с возможностью взять часть запечатанной руды через выпускающие отверстия соседних или нижерасположенных блоков.

1.2 Сведения о прорывах обводненных масс

Прорывы обводненных масс различаются между собой генезисом, составом пород, механизмом проникновения, источником вод и т. д. В рамках исследований, разработана классификация, которая отражает особенности происхождения и проявления прорывов (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация прорывов обводненных пород в горные выработки

Прорывы обводненных масс и вод, несущих взвешенные породы				
Генезис	Техногенные		Естественные	
Источники вод	Поверхностные	Подземные	Поверхностные	Подземные
Коллектор	Дамбы/ хвостохранилища, пруды, воронки обрушения	Зона обрушения	Реки, озера	Плывуны, водоносные горизонты, карст
Происхождение прорывоопасных пород	Хвосты обогащения, осадочные породы (пески, глины и т.д.)	Вышележащие породы осадочные породы / руда склонная к прорывам	Осадочные породы	Осадочные породы
Механизм проникновения	Фильтрация сквозь массив, потеря устойчивости	Фильтрация сквозь массив, потеря устойчивости, тиксотропия, перемешивание	Подработка водных объектов, потеря устойчивости	Подработка, прорыв под давлением, потеря устойчивости
Состав прорывов	Вода, несущая взвешенные частицы	Обводненные пластичные массы	Вода, несущая взвешенные частицы	Вода, несущая взвешенные частицы
Примеры месторождений	Mufulira , Замбия, 1976 г ш. Соколовская, Казахстан	IOZ mine , наст. время Индонезия, ш. Соколовская, Казахстан, Dutoitspan , ЮАР	Diamond Crystal Salt Compan , 1980 г. Lake Peigneur, США	Majialiang mine , КНР miro

Влияние прорывов на горное производство обусловлено комплексом геологических и горнотехнических факторов, которые формируют специфические условия на месторождениях, отличающихся по виду происхождения полезного ископаемого. В данном разделе рассмотрены особенности проявлений прорывов на характерных типах месторождений – рудных, кимберлитовых, угольных.

1.2.1 Аварии на кимберлитовых месторождениях

По-видимому, прорывы обводненных масс в подземные выработки сопровождали горное дело на протяжении всей его истории, однако отражение в периодической литературе проблема получила только на рубеже XIX и XX столетий.

Одной из первых публикаций на данную тематику является статья Дж. Р. Саттона в 1895 г. В статье рассматриваются причины серии прорывов, начавшихся в 1894 г. на руднике De Beers в г. Кимберли, ЮАР. В частности, в своей работе он

упоминает о произошедшем как о новом типе угрозы, с которой сталкиваются горняки [16]:

“To the ordinary risks to life and limb, from blasting, from skip and trolley accidents, from sudden and unexpected falls of ground, to which all mines are more or less liable, the De Beer’s Diamond Mine at Kimberley has of late added the almost unique and unenviable distinction of mud rushes. It would scarcely be possible to convey, by a mere description, any idea of the appalling aspect in which death presents itself when the mud breaks loose. The tunnels and chambers near its point of exit are filled up almost at once; all the candles are extinguished by the rush of air, and in the black darkness men run for their lives”.

Перевод:

“К обычным рискам для жизни в результате взрывов, аварий с подъемниками и вагонетками, внезапных и неожиданных обрушений кровли, которым в той или иной степени подвержены все шахты, в последнее время практически уникально и незавидно отменился прорывами глины и песка алмазный рудник Де Бирс в Кимберли. Едва ли можно передать простыми словами представление о том ужасающем облике, в котором является смерть, когда грязь врывается в выработки. Галереи возле места прорыва заполняются почти мгновенно; все свечи гаснут с порывом воздуха, и в черной тьме люди бегут, спасая свою жизнь”.

Всего под управлением компании De Beers в Кимберли четыре подземных рудника, Dutoitspan, Bultfontein, De Beers, и Wesselton [17]. Так или иначе, аварии, связанные с прорывами в горные выработки, проявлялись на каждом из них. На руднике Wesselton, Кимберли, начавшем работу в 1890 г., в связи с опасностью прорывов обводненных масс была запроектирована и пройдена одна из первых дренажных галерей, которая введена в эксплуатацию в 1899 г. Такое решение было принято в связи со сложными гидрогеологическими условиями. На этом руднике, по сравнению с другими подземными разработками этой геологической провинции, объем откачиваемых вод был больше, а водоносный комплекс

располагался глубже [18]. Тем не менее, это не остановило появление прорывов. В результате аварий, связанных с прорывами, только с 1919 г. по 1950 г. на руднике погибло 20 человек, крупнейшая авария унесла жизни 12 сотрудников.

На руднике Dutoitspan, Кимберли для защиты от прорывов с 1908 г. применялась система дренажа, состоящая из двух туннелей, располагающихся на глубине 20 м и 45 м от поверхности. На этом же руднике успешно применялись такие меры, как специальные выработки на рудной границе для выпуска осадочных пород, а также разработанная в 50-е гг. XX века система быстрого оповещения [18].

С 1947 по 1953 гг. в шести авариях на рудниках De Beers погибло от 10 до 27 человек [19]. При этом профессиональным сообществом, даже в послевоенное время, проблемы прорывов обводненных масс на рудниках характеризуется как специфическая угроза, характерная для кимберлитовых месторождений [20].

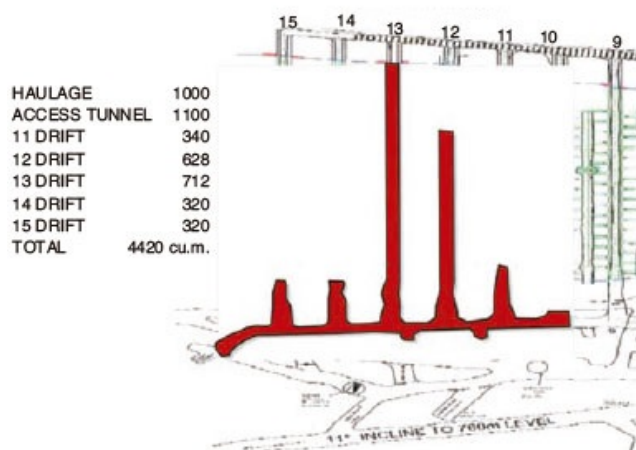


Рисунок 1.4 - Схема выработок, заваленных породой в результате аварии на руднике Dutoitspan, ЮАР, 2011 г [21].

Проблема остается актуальной и в настоящее время. За 10 лет, с 1990 г. по 2000 г., вследствие аварий, вызванных прорывами на кимберлитовых месторождениях, погибло как минимум 24 человека [9]. Одной из последних крупных аварий является прорыв глинистых масс на руднике Dutoitspan. Авария произошла на комплексе 870 м, в горные выработки прорвалось более 4 тыс. куб. м породы [22]. Схема аварии приведена на Рисунок 1.4.

1.2.2. Прорывы на угольных месторождениях

Проблемы прорывов не ограничиваются алмазными, тем более рудными разработками. V.S. Vutukuri и R. N. Singh в своей работе [23] ссылаясь на [24] показывают, что проблема внезапного затопления шахт в Британии в период с 1815 г. по 1970 г. стояла достаточно остро, а также, что среди причин затоплений и гибели людей являлись прорывы из вышележащих водоносных комплексов.

A. W. Davies в работе [25] указывает нормы безопасности, действующие в Британии [26], регламентирующие меры безопасности и размеры целиков, призванные предотвращать прорывы вод, а также обводненных песка, гравия, ила или другого материала, который течет во влажном состоянии.

Известны прорывы вод и обводненных пород на месторождениях СССР на шахте им. Кирова, Ленинградская область (26 прорывов), Киреевском руднике (объем вынесенных пород составил 5700 куб. м), Подмосковский угольный бассейн, ш. Буланаш на Урале и множество других [27].

В Силезском бассейне в течение XX века были весьма распространены аварии, вызванные прорывами. Согласно P. Bukowsky [28] пик аварийности пришелся на середину века, во время экстенсивного развития подземных разработок. Вместе с тем с развитием индустрии и повышением техники безопасности, с одной стороны, и постепенным дренажом массива вокруг горных разработок к концу XX века аварийность, связанная с угольными шахтами в этом регионе, постепенно сходит на нет, Рисунок 1.5.

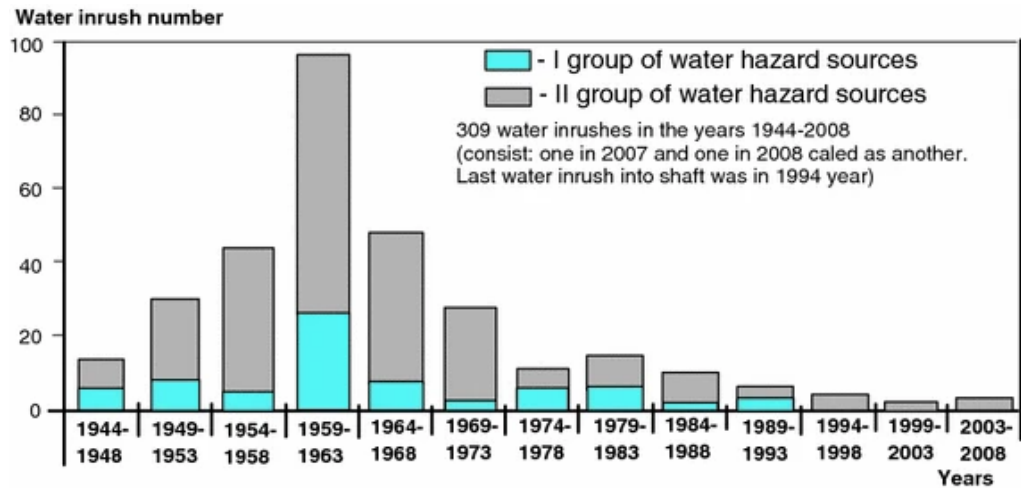


Рисунок 1.5 – Статистика прорывов подземных вод к месторождениям Силезского бассейна в период с 1944 по 2008 гг. [28]

Автор не выделяет на графике отдельно прорывы рыхлых пород, однако отмечает значительное снижение частоты прорывов обводненных пород после 1976 г. Так, только три прорыва, которые были содержали рыхлый материал, произошли между 1977 г. и 1985 г.

Вместе с тем проблема все еще актуальна для стран, в которых широко распространены угольные разработки, в первую очередь для Китая. D. Bringemeier приводит статистику по смертности на угольных шахтах активно добывающих уголь стран [29].

Таблица 1.2 – Статистика смертности на угольных рудниках Китая, США, Индии и Австралии с 2002 по 2012 гг.

Category	China	United States	India	Australia
Flooding	8(196)	24(0)	1(200)	3(0)
Intersecting well	-	45(0)	-	2(0)
Intersection mine void	11(143)	38(0)	3(47)	1(0)
Strata water	5(103)	19(0)	-	1(0)
Dam failure/levee breach	1(172)	9(0)	-	0
Leaking/failing but seal	-	7(0)	-	0
Mine fill inrush	-	1(0)	-	0
Pump failure	1(23)	1(0)	-	0
Unknown	120(1536)	19(0)	1(17)	0
Total	>146(>2173)	163(0)	>5(>264)	7(0)

Статистика показывает более высокий уровень промышленной безопасности в США и Австралии. За приведенный период даже серьезные аварии не приводили к человеческим жертвам. В Китае за это же самое время произошло 143 аварии, унесшие жизни более 2000 горняков, при этом причины большей части аварий остались неизвестными. В связи с тем, что такие причины, как затопление поверхностными водами или затопление из соседних затопленных шахт, как правило, легко идентифицируются, причинами большинства аварий с неопределенным генезисом, в конечном счете, являются прорывы вод из подработанных водоносных комплексов, карстов, пльвунов и т. д.

Следует отметить, что несмотря на специфику прорывов на угольных рудниках (прорывы отличаются коллектором, механизмом проникновения, Таблица 1.1), исследователи аварий на угольных месторождениях внесли заметный вклад в развитие методов защиты и ликвидации последствий прорывов [27].

1.2.3. Аварии на рудных месторождениях

С совершенствованием технологий обогащения, бурения, откатки и распространением новых масштабных систем подземной разработки во второй половине XX века появилось заметное число аварий на рудных месторождениях [30]. На этот период приходятся аварии на рудниках Mifulira в 1970 г., Bafokeng Mine в 1974 г. [18], Carolusberg Deep Mine [31] и др. На территории СССР в этот промежуток времени приходятся аварии на рудниках горной Шории: Темир-тау, Шерегеш, Таштагол и др. На руднике Темир-тау в 1959–1968 гг. происходили неоднократные аварии, которые сопровождались выводом из строя участков добычи. Объем вышедших масс доходил до 1,5 тыс. м³ [32]. На Шерегешском руднике аварии происходили в 1965 г. – 1970 г., всего за это время произошло 28 прорывов на двух рабочих комплексах. Крупнейшая авария произошла в 1969 г., объем рыхлого материала составил 3500 м³, 800 погонных метров выработок оказалось затоплено.

В криворожском бассейне к 1969 г., вследствие проблемы прорывов обводненных масс, общие потери чистых и разубоженных руд превысили 550 млн т [32, 33]. Прорывы происходили на руднике им. Ленина, шахте “Гвардейская”, шахте “Коммунар”, руднике “Ингулец”, шахте “Комсомольская” (Рудоуправление им. Розы Люксембург). На руднике им. Ленина прорывы имели место с 1963 г. по 1969 г., источником прорывов были глины, складированные в карьере в результате неправильного планирования. Масштабы прорывов привели к существенным потерям руды. К 1969 г. потери составили более 500 тыс. т [32].

На ш. Гвардейская, с 1967 г. по 1969 г., глинистой породой в течение серии прорывов затоплялись выработки четырех комплексов. В результате была остановлена добыча на одном из рабочих комплексов залежи “Комсомолка-Южная”. Потери руды по залежи составили до 70%. На руднике Коммунар, во время аварии 1967 г., прорыв глинистой массы затопил выработки двух комплексов. Объем превысил 4 тыс. куб. м [32]

На Уральских рудниках известны аварии на ш. «Южная» в 1963-1964 гг. и в 1979 г., а также авария на Богословском руднике в 1978 г. [34]. Общий объем вышедших пород на ш. Южная в 1963 г. составил 550 куб. м. Авария происходила в два этапа, с интервалом в 6 дней. В первый раз скреперный штрек был заполнен на две трети в течение 10 минут. В результате аварии объем потерянной руды составил около 50 тыс. т и примерно такой же объем масс проник в горные выработки во время аварии 1964 г.

Авария на Березовском полиметаллическом руднике (Усть-Каменогорск) в 1958 г. произошла в результате прорыва 7 тыс. куб. м из зоны обрушения. Вышло из строя более 250 п. м откаточных выработок [35]. Известны случаи прорывов из выпускающих воронок (дучек) на Зыряновском руднике [35].

Достаточно хорошо в литературе описана ситуация на ш. «Соколовская». Изначально с учетом сложных гидрогеологических условий (ожидаемых прорывов подземных вод и рыхлых отложений [36]) отработка северной части месторождения велась системой с закладкой выработанного пространства. При этом в силу слабой устойчивости пород кровли происходили неоднократные

выходы воронок обрушения на поверхность до того, как очистные камеры были заложены. С переходом в конце 80-х и начале 90-х на систему с обрушением произошло множество крупных и мелких аварий. Во время крупнейшей аварии, произошедшей в 2005 г., в подземные выработки прорвалось более 35 тыс. куб. м. породы [37, 38].

Известны аварии за рубежом. Авария на руднике Maroelabult Mine произошла в декабре 2004 г. Обводненные породы прорвались в горные выработки из рудоспуска, в результате прорыва погибло 5 человек [18]. Известна проблема выходов руды на крупнейшем медном руднике в мире El Teniente, Чили. Всего за период с 2001 г. по 2017 г. только в одном из секторов (Diablo Regimiento) El Teniente mine зафиксировано 94 прорыва обводненных рыхлых отложений и 282 сухих [39, 40].

Известны аварии на рудниках IOZ и DOZ компании Block Cave Mine, PT Freeport Indonesia [41, 42, 43]. В течение отработки зафиксировано нескольких десятков крупных и мелких аварий, связанных с прорывами пластичных масс в горные выработки. Один из последних известных прорывов, унесший жизни горняков, случился 2 февраля 2021 г. Авария произошла на руднике New Afton, Канада.

Таким образом, аварии, связанные с прорывами обводненных масс на подземных рудниках – достаточно распространенное явление. При этом наблюдается два принципиально разных механизма проникновения масс в подземные выработки. Первый из них чаще наблюдается при разработке угольных месторождений, однако встречается и на рудных – внезапные прорывы вод, несущих с большой скоростью взвешенные породы в подземные выработки. Второй тип – внезапное проникновение вязких пластичных глинистых пород из зоны обрушения через выпускающие выработки на комплекс выпуска.

1.3 Состояние вопроса о прорывах обводненных масс

Перед дальнейшим изложением следует определиться с терминами. В английской литературе используются термины “*mud rush*”, “*mudrush*”, “*mud inrush*”, “*wet muck*”, “*mud ore*” – mud, muck – грязь, rush, inrush – прорыв, wet –

влажный, ore - руда (с англ). “Mudrush”, “Mud rush”, наиболее часто применяется в широком контексте, при упоминании любых прорывов в горные выработки, независимо от проявления и условий возникновения. Впервые начал применяться на Кимберлитовых месторождениях. Второй, “mud inrush”, является идентичным первому, но наибольшее распространение получил в контексте внезапных прорывов при подработке водных объектов на угольных месторождениях. Термин “wet muck” получил наибольшее распространение на рудниках компании Freeport в Индонезии и еще нескольких месторождениях. Он обозначает руды, близкие по структуре к глинам, склонные при увлажнении к прорывам.

Отечественными исследователями [44, 32] выделяются понятия:

Прорыв увлажненных песчано-глинистых пород (грунтов, отложений) – проникновение в горные выработки из зоны обрушения пород, состоящих из глины, и возможно песка в объемах, создающих угрозу безопасного ведения горных работ и технологических процессов. Использование термина *грунт* вместо *порода*, по аналогии с инженерной геологией и строительными науками подчеркивает измененное, вследствие техногенного воздействия, состояние, в отличие от пород естественного залегания. В данном случае под техногенным изменением понимается нарушение естественной структуры *пород*, вовлеченных в обрушение. В качестве синонима может использоваться *прорывы осадочных отложений*.

Прорывы вод с интенсивным выносом пород (грунтов) из зоны обрушения – прорывы вод, вследствие подработки водных объектов (поверхностных водоемов, карстов, водоносных комплексов, старых горных выработок, воронок обрушения, хвостохранилищ и т.д.), и приносящие с собой взвешенные твердые частицы: пески, глины, шлам и др.

В этой работе, в качестве широкого термина, включающего в себя любые проявления прорывов пород, используется термин *прорывы обводненных масс*.

Проблема прорывов обводненных масс – комплексная, возможные пути ее решения опираются на достижения нескольких дисциплин, среди которых

механика скальных массивов, механика грунтов, гидродинамика, а также технология разработки месторождений.

1.3.1 Работы в области проектирования, геомеханики и дренажа рудных месторождений

Разработке систем с массовым обрушением посвящено большое количество публикаций. В работах второй половины XX века, М. И. Агошкова [45], В. Р. Именитова [46], Г. М. Малахова [47] и др. проработаны инженерные, экономические и технологические вопросы разработки рудных месторождений подземным способом. Особый упор авторы делают на системы с принудительным обрушением. Они рассматривают условия применения и схемы разработки, а также возможные риски и осложняющие факторы, среди которых присутствуют прорывы обводненных масс в горные выработки.

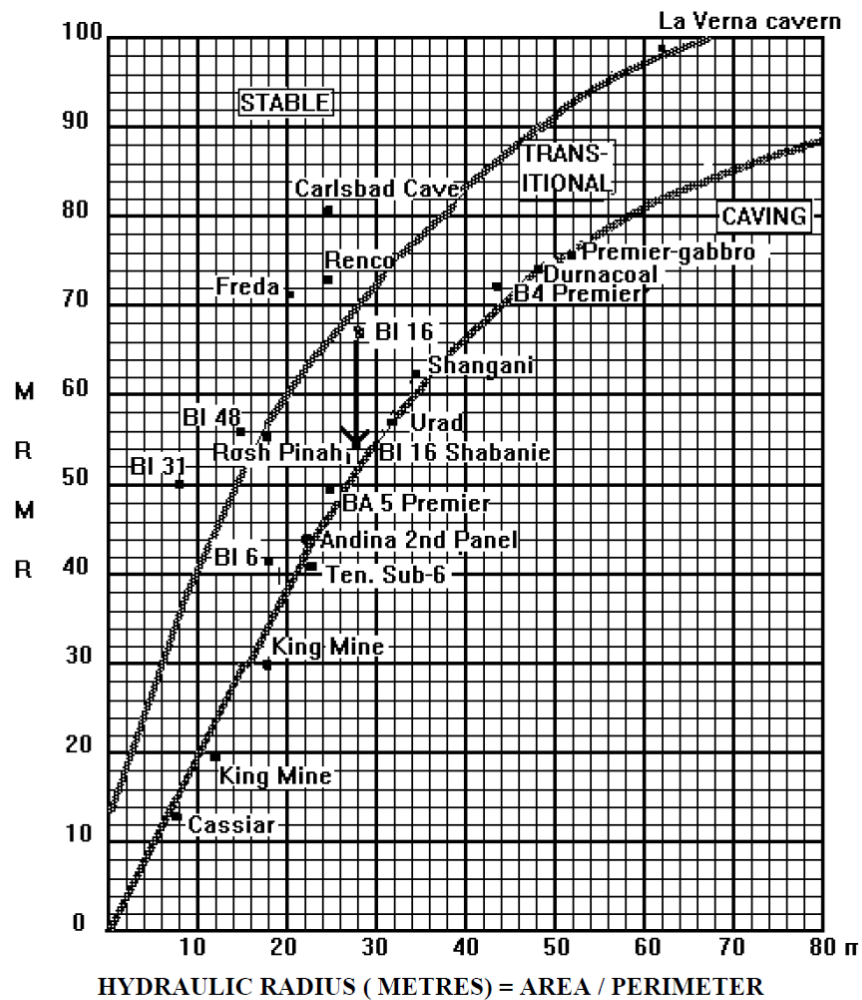
В работах конца XX – начала XXI века таких авторов, как В. Н. G. Brady [21], E. T. Brown [11], D. H. Laubscher [48] наиболее полно проработаны и изложены современные геотехнические вопросы разработки крупных рудных тел системами с блочным самообрушением (англ. - block saving mining method).

В. Н. G. Brady и E. T. Brown [21] в своей работе изложили принципы механики скальных массивов и свойств горных пород применительно к проектированию блочного самообрушения, включая методы численного моделирования поведения скальных массивов.

D. H. Laubscher модифицировал систему классификации горных пород RMR (rock mass rating), разработанную Z. T. Bieniawsky [49, 50] для целей проходки туннелей и выработок. D. H. Laubscher адаптировал ее для использования при проектировании блочного самообрушения. На диаграмме Д. Лобшира, Рисунок 1.6 показана связь между категорией пород MRMR (Modified rock mass rating) и размерами обнажения пород, необходимого для самообрушения. Размер обнажения характеризуется гидравлическим радиусом (hydraulic radius), который определяется как отношение площади обнажения к его периметру. Автор выделяет

на графике три области, характеризующие условия обнажения – стабильную (stable), переходную (transitional) и самообрушения (caving).

Большую роль в современных представлениях о механике скальных массивов сыграли работы Л. Мюллера [51], К. Terzaghi [52], К. В. Руппенейта [53], Ж. Талобра, С. Г. Авершина [54, 55, 56], Э. Хоека [57], Б. Брауна [11], А. Д. Сашурина [58, 59, 60], А. В. Зубкова [61] и др.



STABILITY DIAGRAM - STABLE: Will form stable back to stopes.

TRANSITIONAL: Supportable in upper band and intermittent caving/arching in lower band and could stabilise with small change to MRMR.

CAVING: Progressive caving of back or sides of current cave areas.

CAVABILITY, function of:-

Rock mass strength]
Geological structure]
In situ stress]
Water]
Induced stress]
Excavation geometry]
	= MRMR

Рисунок 1.6 - Диаграмма Лобшира

Основной вклад С. Г. Авершина заключается в разработке теории и методов описания и прогноза сдвижения горных пород на основе механики сплошной среды, однако он также занимался вопросами деформирования шахтных стволов, расчета потолочин кровли, горными ударами, а также вопросами сдвижения при подработке водных объектов [51, 52, 53].

Работы Н. Хафта [62], Ж. Талобра [63], А. Д. Сашурина посвящены методам определения напряженно-деформированного состояния (НДС) скальных массивов и формированию НДС вокруг горных выработок.

Вопросами горнопромышленной гидрогеологии занимались Д. И. Щеголев [64, 65], Г. Н. Каменский [66], С. П. Прохоров [67, 68] Н. И. Плотников [69], С. В. Троянский [70], С. К. Абрамов [71, 72, 73], В. А. Мироненко [74, 1, 5, 75], В. Д. Бабушкин [3], Ю. А. Норватов [4, 2, 76], В. Г. Румынин [5] А. М. Гальперин [6, 77, 78] Л. Л. Бокий [7] и др. Их работы посвящены изучению техногенного режима фильтрации подземных вод в области воздействия горных работ, методам расчета фильтрационных потоков и обоснования систем осушения месторождений, оценке влияния подземных вод на условия разработки месторождений, гидрогеологическому обоснованию мер защиты горных выработок, прогнозированию водопритоков, охране подземных вод в горнодобывающих районах и др. вопросам,

В классических работах В. А. Мироненко, В. Д. Бабушкина, Ю. А. Норватова В. Г. Румынина, А. М. Гальперина, Л. Л. Бокия, Ф. П. Стрельского и др. описаны зоны водопроницающих трещин и зоны обрушения вокруг очистных выработок [1] [3] [8] [79]. Эти техногенно-нарушенные области массива характеризуются повышенной водопроницаемостью и составляют известную опасность прорывов подземных вод и обводнённых песчаных и глинистых пород. Однако размеры изученных и описанных зон составляют десятки метров, и не нарушают сплошность лежащих выше мощных водоупорных слоев.

В работах Ю. С. Осипенко и Д. М. Казикаева разработаны принципы классификации подрабатываемых водных объектов (в т. ч. водоносных комплексов, пльвунов и т. д.), обобщены принципы борьбы с водопритоками к

месторождениям полезных ископаемых [36]. Ю. С. Осипенко разработаны аналитические решения течения осадочных пород сквозь рудную подушку в очистной зоне [34].

1.3.3 Физико-механические свойства обводненных глинистых и песчаных пород, условия возникновения прорывов

Исследованиями свойств обводненных грунтов и пород, склонных к прорывам, их состава, вещественного, фракционного, механических параметров и др. занималось достаточное количество авторов. В СССР исследованиями в области защиты от прорывов обводненных масс начали заниматься применительно к угольным месторождениям [80, 81]. Изучением способов воздействия на массив горных пород с целью снижения опасности прорывов при разработке месторождений занимались в ВИОГЕМ, ВостНИИ, ТПИ, ИГД СО РАН, НИГРИ, Санкт-Петербургском горном институте, Криворожском Горнорудном институте и др.

Исследованиями обеспечения безопасности подземных сооружений от прорывов песчано-глинистых пород в аспекте изменения состояния массива при проходке горных выработок занимается Петербургская школа гидрогеомеханики: Ю. А. Норватов, А. Г. Оловянный [82, 83] О.Г. Котлов [84] В. В. Назима [85] и др.

Н. Я. Халитов, В. И. Федоров и др. исследовали свойства глинистых пород для задач строительной механики в области фундаментов, и строительства железных и автомобильных дорог [86, 87]. Среди основных направлений исследований – определение соотношений скальных пород и глинистого заполнителя с целью добавления щебня и бутового камня к глинистым породам, для обеспечения стабильности и минимизации текучести и пластичности. В работах Г. А. Быстрова [81] установлено, что добавление к глинистым породам скального материала до 50% может значительно снижать текучие свойства.

Д. М. Казикаевым и Б. Н. Болотовым в работе [88] рассмотрено механическое взаимодействие и взаимное перемещение обрушенных скальных пород кровли и

пород рыхлой толщи и особенно обводненных песков. В опытах на истечение материала через щель с изменяемыми размерами, получены зависимости расхода материала от размера выпускного отверстия.

А. П. Широков, Ю. Н. Кулаков, Л. М. Синельников на основании 120 прорывов на угольных месторождениях [44] пришли к следующим выводам:

1. Прорывы формируются породами, близкими по составу к пескам и глинам, содержание пылеватых частиц 71-95%, глинистых 2-25%;

2. В зоне обрушения влажность глинистых пород близка к первому пределу пластичности (пределу раскатывания), обычно выше него на 4–6%, до достижения второго предела пластичности (предела текучести) остается 8-22%. Условиями прорывов в данном случае являются увеличение влажности или повышение гидростатических напоров;

3. При увеличении нагрузки глинистые породы приобретают способность течь при влажности ниже не только предела текучести, но и предела пластичности.

4. При добавлении к глинам обломков скальных пород, увеличивается пороговое давление предела текучести

Близки по тематике исследования зарубежных авторов, классифицирующих сильно метаморфизированные “грязевые руды” (mud ore). Для месторождения IOZ mine, Индонезия, получена классификация руд для выбора методов погрузки и откатки. Классифицирующими признаками выступают влажность ω и гранулометрический состав G , в зависимости от которых рекомендованы различные техники откатки (Таблица 1.3). Также для этого месторождения определено, что в составе обводненных пород, появляющихся в выработках содержание мелкой фракции, с размером зерна зерен менее 2 мм доходит до 20%, а разжижение руд происходит при влажности более 80% [89].

Таблица 1.3 – Классификация руды рудника IOZ mine по степени опасности прорывов

ω, влажность (%)	G: Содержание зерен, размером менее 50 м.		Техника откатки
	G < 30%	G > 30%	
ω < 8.5%	A: Крупнозернистая сухая	B: Мелкозернистая сухая	Любые виды
8.5% < ω < 11%	C: Крупнозернистая влажная	E: Мелкозернистая влажная	с закрытой кабиной
ω > 11%	D: Крупнозернистая мокрая	F: Мелкозернистая мокрая	на дистанционном управлении

Таким образом, исследования показывают, что опасность прорывов обводненных пластичных масс из зоны обрушения зависит от влажности пород и гидростатического давления веса налегающих пород. Свойствами пород, которые определяют пороговые значения давления и влажности для перехода в опасное состояние, являются: вещественный и гранулометрический состав, предел текучести, предел пластичности, прочность на сдвиг и др.

1.3.2 Исследования в области моделирования прорывов обводненных масс эквивалентными материалами

Применяемые в СССР методы моделирования с помощью эквивалентных материалов выявили ряд особенностей переноса обводнённых пород на рабочие комплексы. Исследования условий выпуска руд для обеспечения безопасности от проявлений прорывов для Криворожского бассейна коллективами НИГРИ и Криворожского института [33] показывают, что щелевой метод выпуска руд обеспечивает меньшее разубоживание и большую безопасность работ.

Эксперименты проводились методом моделирования из эквивалентных материалов. В качестве материалов в модели использовалась специальная смесь (состоящая из песка, фракции 0,2 – 0,5 мм и парафина), моделирующая прочностные и фильтрационные характеристики вмещающих пород рудника им. Дзержинского. Подбор смеси выполнялся согласно выражению для обеспечения эквивалентности физико-механических свойств:

$$G_{сж.э.кв} = \frac{\gamma_n}{\gamma_{э.кв}} \cdot \frac{l}{L} G_{сж.п.}, \quad (1.1)$$

где $G_{сж.э.кв}$, $G_{сж.п.}$ – предел прочности на сжатие эквивалентного материала и породы соответственно, кг/см²,

$\gamma_{пор}$, $\gamma_{э.кв}$ – объемный вес моделируемых пород и эквивалентного материала, г/см³

l , L – линейные размеры модели и моделируемого объекта.

Коэффициенты фильтрации эквивалентного материала подбирались исходя из зависимости:

$$k_{ф.э.} = \frac{k_{ф.п.}}{\alpha \sqrt{N}}, \quad (1.2)$$

где $k_{ф.э.}$ – коэффициент фильтрации эквивалентного материала,

$k_{ф.п.}$ – коэффициент фильтрации моделируемых пород.

α - коэффициент, учитывающий невозможность полного подobia условий модели и натуры, определяемый с учетом фактических водопритоков в натуре и на модели из зависимости:

$$\alpha = \frac{Q}{q \cdot N^{5/2}}, \quad (1.3)$$

Для рудника Дзержинского $\alpha = 0,004$.

Ослабление по поверхностям напластования моделировалось добавлением талька. Расхождение модели и натуры между контролируемыми параметрами – размером зоны обрушения на поверхности и глубины зоны обрушения не превысило 15%. В процессе моделирования отработки этажей фиксировались оседание поверхности, развитие трещин и разломов, проникновение обводнённых пород.

Результаты экспериментов показали:

- 1) Выполаживание углов сдвижения, с увеличением глубины работ.
- 2) Глубина проникновения обводнённых пород ниже поверхности зоны обрушения составляет около 60 метров, безопасная глубина работ для рудника им. Дзержинского составляет 170-300 метров.

3) В условиях выпуска через воронки, при уплотнении руд, основное разрыхление пород и перемещение пород происходит непосредственно над воронками, образуя изолированные трубообразные каналы, вокруг которых происходит формирование поверхности сдвига. За счет таких вторичных каналов обрушения облегчается проникновение обводненных масс на комплекс выпуска. Авторы отмечают, что возможный метод борьбы с таким явлением – равномерный выпуск руды невозможен в силу систематических зависимостей, обусловленных свойствами руд.

4) Щелевой выпуск руды обеспечивает более равномерный выпуск, меньшее разубоживание и большую безопасность горных работ.

Подобные эксперименты, моделирующие условия ш. “Соколовская”, приведены в работе Д. М. Казикаева [36]. Отработка рудных тел моделировалась с помощью песчано-парафиновых и песчано-вазелиновых смесей на плоском стенде в масштабе 1:250. В рамках моделирования палеозойского комплекса скальных пород авторы уделили внимание имитации особенностей структурной раздробленности массива – эквивалентности прочностных характеристик в куске и в массиве на модели и в натуре. Обводненные породы моделировались мелкозернистым песком фракцией менее 0.25 мм.

Моделировалась отработка системы с принудительным этажным обрушением и двухстадийной отбойкой запасов.

Результаты экспериментов показывают:

1) Углы воронкообразования, в отличие от криворожских рудников, не выполаживаются. Более того, с приближением к земной поверхности, зона обрушения характеризуется небольшим систематическим сужением (уменьшением комплексального сечения). При этом образуются консольные зависания массива. Практика эксплуатации Соколовского месторождения, в дальнейшем, подтвердила этот механизм воронкообразования. По-видимому, воронкообразование на Соколовском месторождении подобно формированию вторичных каналов в уплотненных рудах Криворожского бассейна.

2) Во всех смоделированных режимах очистных работ выпуск руды приводит к неравномерному движению пород в зоне обрушения и проникновению высокоподвижных вышележащих меловых песков на комплексы выпуска. В дальнейшем выпуск руды приводит к формированию вторичных воронок. Воронки формируются вследствие выпуска пород на любой глубине и достигают земной поверхности. В воронки быстро проникают обводненные осадочные породы. Потери отбитой руды могут составлять до 50%.

3) Наблюдается два механизма проникновения песков на комплексы выпуска. Первый – через краевые зоны вторичных воронок обрушения. Второй – при консольном или сводообразном зависании, образованные пустоты быстро заполняются обводненными породами. Заполненные песчано-глинистым материалом пустоты, покоятся на слое руды и перемещаются вниз вместе с выпуском руды, почти не деформируясь. При достижении почвы блока и выпускающих выработок материал проникает в выработки. Подобный механизм проникновения описан в руководстве по борьбе с прорывами на кимберлитовых и рудных месторождениях (ЮАР) [9].

1.3.4 Математические модели фильтрации обводненных масс

Ряд решений по обеспечению безопасности прорывов обводненных масс [36] и определению параметров рудной подушки основывается на аналитических моделях.

Движение глинистых пород в обрушенном пространстве сквозь скальные породы рассматривается как перемещение вязко-пластичной жидкости в пористой среде. Такой подход позволяет обобщенно описывать сложную неоднородную систему обрушенных пород как сплошную среду и рассматривать фильтрацию глинистых грунтов как реологическую модель тела Бингама [90]. Условием течения тела Бингама-Шведова является превышение действующих касательных напряжений над предельным напряжением [91]:

$$\tau_i - \tau_n = \mu_{nl} \dot{\gamma}, \quad (1.4)$$

где: τ_i – действующие касательные напряжения

τ_i – предельное напряжение сдвига

$\mu_{пл}$ – коэффициент пластической вязкости

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига

При рассмотрении однородного изотропного распределения плотности скальной массы, независящего от температуры и давления, движение песчано-глинистых масс внутри единичного объема описывается обобщенным для вязко-пластичной фильтрации законом Дарси [36]:

При $\frac{\partial P}{\partial x} > \beta_0$:

$$\begin{aligned} V_x &= -\frac{c}{\mu_{пл}} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \beta_0 \right), \\ V_y &= -\frac{c}{\mu_{пл}} \left(\frac{\partial P}{\partial y} - \beta_0 \right), \\ V_z &= -\frac{c}{\mu_{пл}} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \beta_0 + \gamma \right), \end{aligned} \quad (1.5)$$

где V – средняя скорость движения Бингамовской жидкости через разрушенные породы, определяется как действительный фильтрационный расход ΔQ , проходящий через сечение ΔS .

$$V = \Delta Q / \Delta S, \quad (1.6)$$

c – коэффициент проницаемости среды,

$\mu_{пл}$ – коэффициент пластической вязкости,

β_0 – начальный градиент сдвига.

Для пористой среды начальный градиент сдвига определяется как:

$$\beta_0 = 2\tau_n / r_k, \quad (1.7)$$

где r_k – гидравлический радиус, представляющий отношение объема жидкости к смачиваемой поверхности.

При непосредственном контакте глинистых грунтов с горными выработками (отсутствии скальной “подушки”) движение описывается законами гидравлики неньютоновской жидкости.

На основе рассмотренной геофильтрационной модели сотрудниками ВИОГЕМ разработаны решения по расчету параметров породной подушки для предотвращения прорывов [44], а также несколько расчетных схем по прогнозу прорывов глинистых грунтов в горные выработки. Предложенные решения были выпущены в виде рекомендаций [34] в 1984 г.

Группа исследователей из Чилийского университета провела исследование по изучению поля скоростей фильтрации подземных вод через скальный массив к выпускающим воронкам [92]. Исследование выполнены с применением аналитических моделей фильтрации Дарси-Бринкмана [93], которое применяется для моделирования потоков жидкости через пористую среду. Плотность среды вокруг в области эллипсоида выпуска задается согласно распределению Квапила [94, 95]. Исследования показывают, что данная модель хорошо подходит для пористых сред с коэффициентом пористости в пределах 0.05 [96]. Уравнения Дарси-Бринкмана были реализованы методом конечных элементов в двумерной постановке. Моделирование осуществлялось в среде Comsol. Авторы, опираясь на априорную взаимосвязь скорости фильтрации воды через породную подушку и вероятности прорывов, исследовали особенности распределения скоростей в потоке жидкости в области влияния выпускных воронок. В результате моделирования получены зависимости между скоростью течения воды в области выпускающих воронок от начальной скорости, площади выпускающих воронок, размера фрагментов отбитой руды, а также локального изменения плотности скальной массы вблизи выпускающих отверстий.

1.4 Механизм проникновения прорывов в горные выработки

Прорывы из зоны обрушения обладают рядом специфических черт, отличающих их от прорывов с другим характером генезиса. Основным условием

формирования этого типа прорывов является наличие дезинтегрированного массива зоны обрушения.

Известно, что 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 воронок обрушения. 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 [48, 97].

Однако само по себе формирование зоны обрушения еще не приводит к опасности прорывов. Необходимым фактором появления прорывов 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 1.7 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 1.7 б). Эксперименты показывают [88], 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 вод*. Источником вод могут быть как подземные – водоносные комплексы, карст, так поверхностные воды. В определенных условиях для формирования прорывов из

зоны обрушения достаточно водопритоков, возникающих вследствие обильных осадков.

По сравнению с зоной водопродвижающих трещин (ЗВТ), которая характеризуется нарушением водозащитной толщи и относительно слабой гидравлической связью между вышележащими водоносными комплексами, образование зоны обрушения от мощных крутопадающих рудных тел приводит к разрушению водоупорных слоев на всем протяжении области воронкообразования и формированию техногенных водоносных комплексов в пределах области дезинтегрированного массива [1].

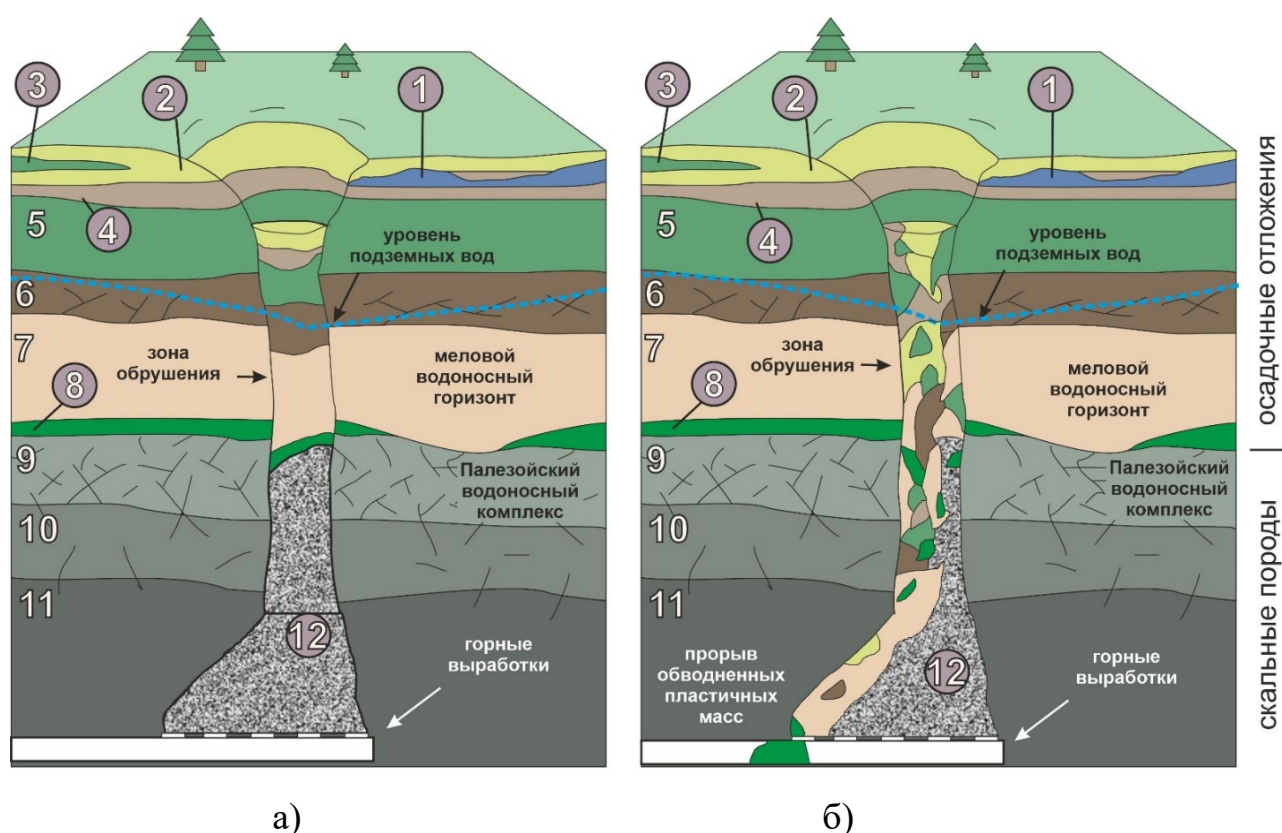


Рисунок 1.7 – Схема формирования условий прорывов обводненных масс из зоны обрушения: а – начальная стадия образования зоны обрушения, б – конечная стадия развития зоны обрушения, со сформированными условиями для прорывов.

Цифрами обозначены: 1) супеси четвертичные, 2) суглинки четвертичные, 3) пески четвертичные, 4) пески олигоценые, 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

Заключительными факторами, влияющими на появление прорывов, является *параметры технологии горных работ* (очередность обработки, равномерность

выпуска, форма выпускающих отверстий и др.), благодаря которым, риски прорывов могут как снижаться, так и возрастать.

1.5 Обеспечение безопасности горных работ от прорывов обводненных масс на горных предприятиях

1.5.1 Прогнозирование прорывов пород в горные выработки

Анализ литературы показывает, что методы прогнозирования опасности прорывов условно можно разделить на две группы:

- 1) на основе аналитических моделей;
- 2) на основе статистических моделей характеристик пород.

Аналитические модели могут различаться сложностью, включать отношения объемов прорывоопасных и скальных пород, базироваться на теоретических основаниях сплошной среды и др. физических принципах. Общей их чертой является детерминированная функциональная связь между исходными параметрами и результатами прогноза. Характерным примером практической реализации этого подхода являются рекомендации по борьбе с прорывами, выпущенные ВИОГЕМ в 1984 г. [34].

Вторая группа основывается на вероятностном подходе и статистических моделях.

Статистические модели могут быть разной сложности (линейные, логистические регрессии, отношение шансов, деревья классификации и т. д.). Статистической обработке подлежат наборы собранных данных, называемых датасетами, включающими ряд априорно задаваемых параметров. В результате обработки определяются коэффициенты признаков модели, наиболее хорошо описывающие имеющийся набор данных. К наиболее простым моделям этой группы можно отнести классификации пород по степени опасности. Статистические модели начали применяться, начиная с десятых годов XXI века, с накоплением архивных материалов и широким распространением обработки данных (следует отметить, что для сбора статистических данных необходима

организация работ достаточно высокого уровня, описанная в следующей главе). Примерами работ в данном направлении [39, 98, 99, 100, 41] являются прогностические модели, разработанные для медных рудников DOZ и IOZ компании Freeport в Индонезии и для месторождения El Tiente, Чили.

Характерной работой является работа чилийского коллектива [98]. В ней рассмотрено семь исходных параметров (предикторов) по каждой выпускающей воронке: количество добытой массы, расход воды, высота колонны прорывоопасных пород, и др. Для анализа предикторов использовались хи-критерий Пирсона и логистическая регрессия [101]. В результате работы получена калиброванная модель (авторы показывают, что точность классификации составляет 84%), включающая в себя наиболее важные параметры, влияющие на прорывы глинистой руды (англ. “wet muck”): выпуск руды, водоприток, наличие “топографических желобов” (локальных депрессий в морфологии окружающих выпускающую выработку), высота столба нарушенной породы и наличие склонной к прорывам руды в соседних выпускающих выработках.

1.5.2 Методы борьбы с прорывами

Как уже упоминалось, впервые с прорывами обводненных масс и пльвунов в СССР столкнулись при отработке угольных месторождений. Е. П. Калмыков рассмотрел условия применений методов борьбы с внезапными прорывами с учетом горно-геологических условий прорывов, вида подрабатываемого водного объекта, питающего прорыв, характер прорыва, источник (карст, трещинные воды и др.), а также последствия [27]. Коллективом авторов (А. П. Широковым, Ю. Н. Кулаковым, Л. М. Синельниковым) была предложена классификация методов борьбы с прорывами в горные выработки на угольных месторождениях [44]:

1. Удержание глин в выработанном пространстве вышележащих комплексов с помощью закладки, межэтажных перекрытий и целиков.
2. Удержание глин на действующем комплексе за пределами рабочих выработок – перепуск вышележащих глин в специальные камеры действующего комплекса, оставление межщитовых целиков.

3. Удержание глинистых грунтов породной подушкой, подушка при этом может создаваться из сухого закладочного материала, рыхлением боковых пород с помощью взрывания, обрушением потолочины и т. д.

4. Снижение пластичности глин за счет размещения отвалов скальных пород на месте будущих провалов на поверхности.

5. Удаление глины из провалов (может осуществляться с помощью экскаваторов с поверхности, при небольших глубинах).

Развитие опыта борьбы с прорывами на рудных месторождениях позволило Д. М. Казикаеву и Ю. С. Осипенко обобщить мероприятия, разделив их на ликвидационные, профилактические и ликвидационно-профилактические [44].

Механизмы прорывов подземных вод и водонасыщенных пород и меры безопасности при разработке угольных месторождений изложены в работе Норватова Ю. А. и Петровой И. Б. [76].

Зарубежные авторы руководств по борьбе с прорывами классифицируют прорывы по источнику происхождения обводненных масс – внутренние и внешние. Внутренними источниками прорывов считаются заглинизированные руды и вышележащие осадочные породы, перемешанные со скальной породой в зоне обрушения. К таким прорывам относится большинство прорывов на Кимберлитовых месторождениях, а также прорывы на ш. “Соколовская”. Ко внешним источникам относят хвостохранилища и другие водные объекты. Самой известной аварией этого типа является авария на руднике Mufulira в 1970 г.

R. Butcher и T. Stacey в руководстве по методам борьбы с прорывами из зоны обрушения рассматривают 4 составляющие прорывов: вода, прорывоопасные породы, выпуск, перемешивание пород в зоне обрушения. Для минимизации риска прорывов авторы рекомендуют использовать три принципа – *дистанция, выпуск, дренаж* [9] (“3 D's principle - Distance, Drain, Draw” – с англ: принцип трех “Д” - Дистанция, Дренаж, Выпуск), Рисунок 1.8.

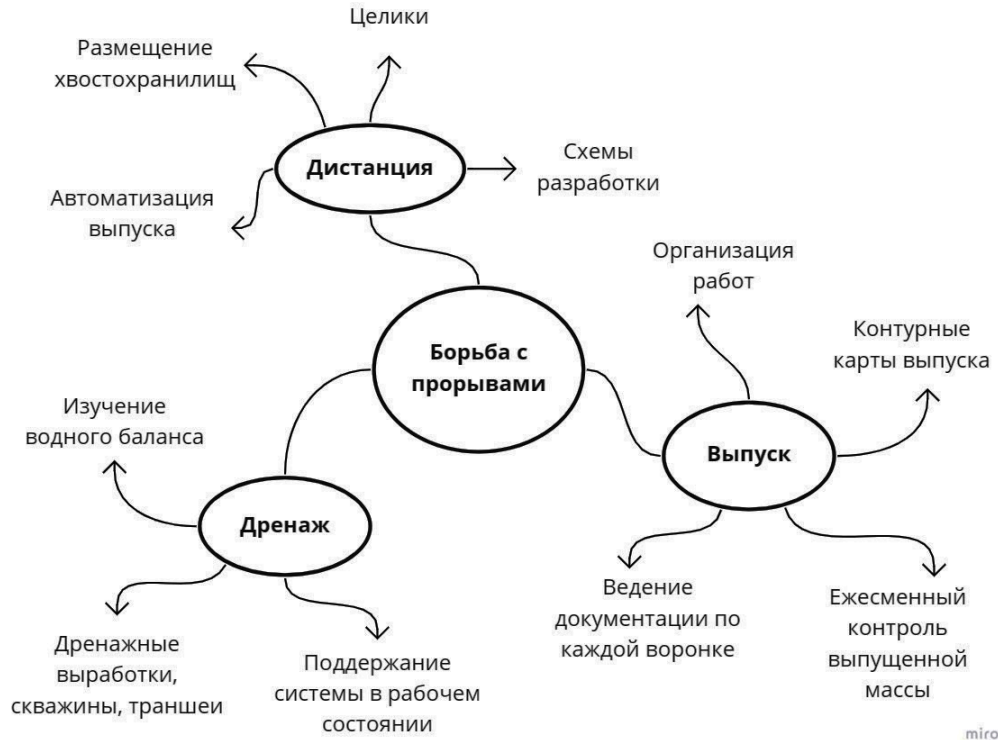


Рисунок 1.8 – Методы борьбы с прорывами обводненных масс.

Дистанция – принцип, согласно которому обводненные прорывоопасные породы должны быть максимально удалены или изолированы от горных работ и сотрудников предприятия настолько это возможно – в основном принцип относится к выбору размещения хвостохранилищ и выбору оптимальных технологических схем разработки, и рекомендует оставление защитной породной подушки. К этому принципу можно отнести и создание перемычек, и автоматизацию процессов выпуска и погрузки [89].

Равномерный выпуск – принцип, согласно которому не должно формироваться каналов проникновения обводненных пород, по механизмам, описанным в разделе 1.3.2. Равномерный выпуск достигается за счет правильной организации работ, к которой относится выделение единого ответственного лица, ведение документации по каждой воронке выпуска (определение запасов каждой выпускающей воронки, ежедневный контроль отгруженной скальной массы и т.д.), а также ежемесячное построение контурных карт выпуска. Это необходимо для прогнозирования каналов проникновения вокруг конкретной зоны выпуска. Архив

выпуска и вся документация по воронкам хранится на протяжении всей отработки рудника [102].

Дренаж – представляет собой комплекс мероприятий, препятствующий обводнению прорывоопасных пород. Включает в себя: 1) изучение водного баланса месторождения, 2) создание выработок, траншей и скважин для максимально возможного перехвата наземных и поверхностных вод, 3) поддержание системы в рабочем состоянии.

Помимо рассмотренных принципов, авторы уделяют внимание организационным мерам по борьбе с прорывами. К ним относятся создание необходимых технических регламентов на производство работ, оценка риска прорывов, технике безопасности работ, система отслеживания предвестников прорыва, а также системе сигнализации и путей эвакуации сотрудников предприятия.

1.5 Выводы

Прорывы обводненных масс представляют угрозу для ведения подземных горных работ. Негативное влияние сводится к трем проявлениям:

- 1) Непосредственная угроза жизнедеятельности
- 2) Нарушение режима горных работ
- 3) Потери и разубоживание руд

Прорывы обводненных масс различаются между собой генезисом, составом пород, механизмом проникновения, источником воды, локализацией и т.д.

В особый тип прорывов, который характеризуется рядом специфических черт, выделяются прорывы из зоны обрушения. Такие прорывы отличает локализация в районе выпускающих выработок, систематический характер появления, а также состав, определяемый наличием глинистых дисперсных пород (или руд) в дезинтегрированном массиве зоны обрушения.

Изучение прорывов осуществляется посредством определения свойств прорывоопасных пород, моделирования (математического и с применением эквивалентных материалов) прорывов и применения статистических подходов.

В практическом плане выделяются четыре фактора, необходимые для формирования прорывов из зоны обрушения: наличие прорывоопасных пород, наличие источников воды, перемешивание пород в зоне обрушения вследствие выпуска, наличие выпускающих выработок и технология работ [103].

Борьба с прорывами строится на основе исключения какого-либо из факторов или снижения его влияния. Методы борьбы классифицируются в соответствии с тремя принципами [9]: Дистанция, Дренаж, Регулирование выпуска (с англ. 3 D's principle - Distance, Drain, Draw), которые признаны и используются в мировой практике. Исследования и практика подземных работ показывают, что наиболее эффективным методом, исключающим основной фактор прорывов – наличие воды, является осушение дезинтегрированного массива зоны обрушения. Комплекс работ по осушению зоны обрушения должен опираться на обоснованные прогнозы водопритоков к горным разработкам.

В связи с этим актуальными задачами являются изучение закономерностей техногенного режима подземных вод, формирующихся вокруг зоны обрушения, и определение фильтрационных и емкостных параметров дезинтегрированного массива зоны обрушения.

2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОРЫВОВ НА СОКОЛОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

2.1 Характеристика месторождения

2.1.1 Общая характеристика

Соколовское железорудное месторождение расположено в г. Рудный, Республика Казахстан, входит в состав Костанайского железорудного бассейна, одного из крупнейших в Евразии, содержащего 85 % запасов железных руд страны.

Климат района сухой, резко континентальный, гидрографическая сеть развита слабо, однако поблизости протекает р. Тобол, дренирующая олигоценый и эоцен-меловой водоносные комплексы. Район месторождения представляет собой равнинную степь, отметки земной поверхности в пределах месторождения колеблются от 175 до 190 м, общий уклон рельефа направлен к югу, в сторону р. Тобол. Она располагается на расстоянии 4 км, является основной водной артерией и источником водоснабжения г. Рудный. Отметка реки в створе месторождения составляет 143 м.

Количество осадков колеблется от 173 до 423 мм в год, среднемноголетнее более 300 мм. С мая по август выпадает более половины годовой нормы. При высокой температуре воздуха и сильных ветрах около 60% пробел осадков расходуется на испарение, 30% идет на сток и только около 10% - на инфильтрацию.

Соколовское месторождение вместе с расположенном в шести километрах от него Сарбайским месторождением образуют Соколовско-Сарбайский железорудный комплекс. Оба месторождения относятся к скарновому типу, имеют схожее строение, а их близко расположенные депрессионные воронки формируют имеют общую единую внешнюю границу влияния радиусом 10 км.

Соколовское месторождение имеет субмеридиональное простирание. Добыча ведется комбинированным способом: большая, южная часть разрабатывается Соколовским карьером, северный участок отрабатывает ш.

“Соколовская” системой с обрушением выработанного пространства. Рудные тела залегают на глубине 200 м и разведаны до глубины 1200 м [104].

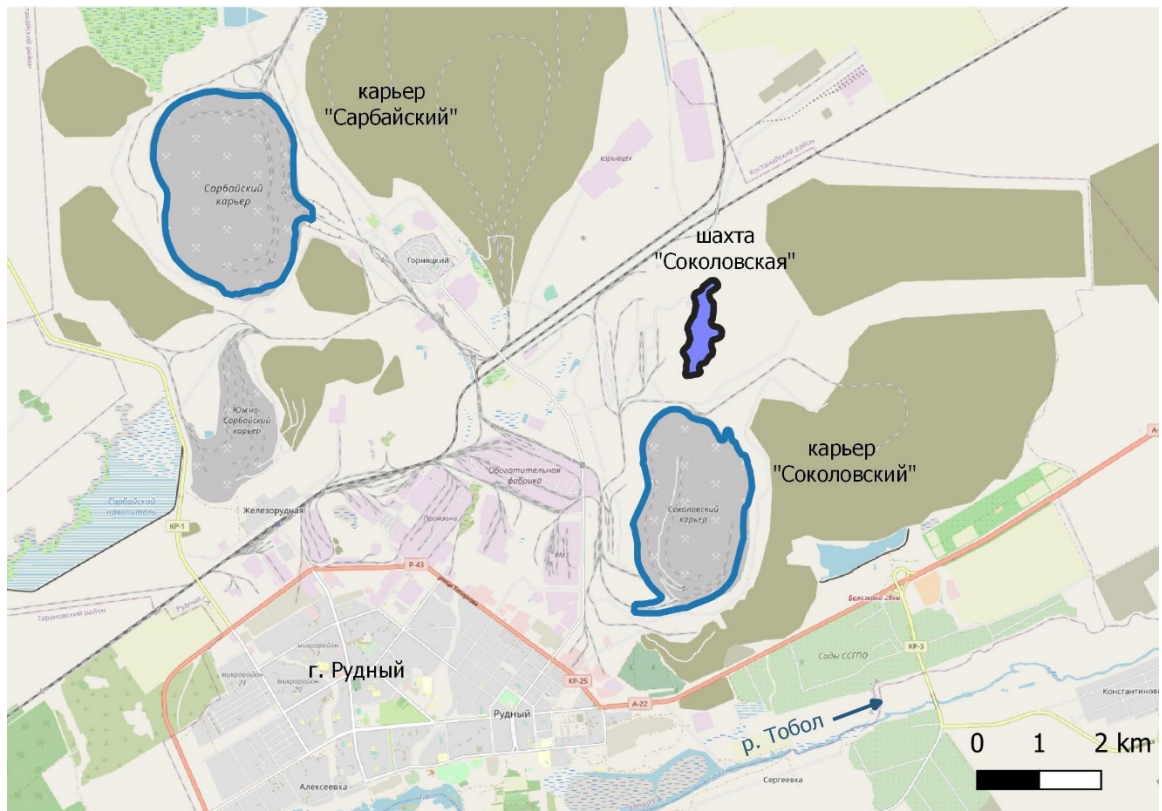


Рисунок 2.1 – Ситуационный план Соколовско-Сарбайской железорудной группы месторождений

Карьер Соколовский на данный момент почти полностью отработан, ведется добыча остаточных запасов. Проектная глубина карьера составляет 580 м, длина - 3300 м, ширина – 1900 м. Размеры северного участка, разрабатываемого шахтой, составляют в длину 1200 м, в ширину 600 м, на данный момент глубина шахты составляет 640 м.

Сверху месторождение перекрыто мезо-кайнозойскими отложениями, мощностью 120 м, в которых выделяется водообильный меловой комплекс в составе эоцен-меловой водоносного комплекса. Для его осушения оба участка месторождения окружены по периметру единым внешним дренажным контуром, который состоит из подземных выработок, пройденных в коренных породах и

оборудованных скважинами для дренирования пород эоцен-мелового водоносного комплекса.

2.1.2 Гидрогеологические условия месторождения

Геологическое строение массива месторождения составляют два резко отличных комплекса пород (Рисунок 1.7):

- осадочные отложения мезозойского и кайнозойского возраста, залегающие до глубины 120 м, в которых выделяются олигоцен-четвертичный и эоцен-меловой водоносные комплексы;
- магматические скальные породы палеозойского возраста, залегающие ниже глубины 120 м, в которых выделяется палеозойский водоносный комплекс.

Осадочные отложения

Комплекс составляет около 120 м верхней части массива горных пород. Послойное залегание пород разного возраста формирует на территории исследований несколько водоносных комплексов, разделенных между собой водоупорными слоями. Основными региональными водоупорными толщами являются слой чеганских глин мощностью до 60 м, и слой маастрихтских глин мощностью до 40 м.

В осадочном комплексе выделяются следующие гидрогеологические элементы: олигоцен-четвертичный, эоцен-меловой, палеозойский водоносный комплексы.

1. Водоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений состоит из четвертичных неогеновых пород мощностью от 0.5 до 30 м. Породы не имеют сплошного распространения. Структура комплекса определяется отдельными линзовидными телами песков, супесей и суглинков. Породы представлены разностями, не имеющими четких границ. Питание инфильтрационное, в основном за счет снеготалых вод. В долине реки комплекс четвертичных отложений выклинивается.

2. Оligоценовый водоносный горизонт имеет повсеместное распространение за исключением долин рек и вместе с горизонтом четвертичных отложений

составляет единый водоносный комплекс. Горизонт сложен песками мощностью около 2-8 м и характеризуется коэффициентом фильтрации до 5 м/сут. Питание горизонта инфильтрационное. Подошву горизонта слагают чеганские глины, являющиеся региональным водоупором.

3. Слой чеганских глин, являющийся региональным водоупором, распространен повсеместно за исключением речных долин (Рисунок 2.2). Мощность толщи составляет до 40 м.

4. Эоценовый водоносный горизонт сложен опоками тасаракской свиты, мощностью до 45 м. Воды распространены в трещиноватых разностях опок и песчаников. В естественном состоянии режим фильтрации является напорным, уровень подземных вод составляет около 155 м (Рисунок 2.3). Фильтрационные свойства водоносного комплекса в целом довольно низкие, коэффициент фильтрации 0,01–2,0 м/сут при наиболее часто встречающихся значениях 0,3–0,6 м/сут. Трещинные подземные воды опокового водоносного комплекса гидравлически связаны с нижележащим водоносным комплексом – питание комплекса происходит за счет меловых песков, подстилающих опоковую толщу.

5. Меловой водоносный горизонт сложен кварцево-слюдяными и кварцево-глауконитовыми песками. Горизонт распространен повсеместно, залегает на лигнитовых глинах и глинисто-щебнистых отложениях коры выветривания. Горизонт напорный, в естественных условиях абсолютная отметка уровня подземных вод составляет 155 – 160 м. Мощность горизонта в районе месторождения до 50 м. Коэффициент фильтрации меняется от 20 до 0,05 м/сут, уменьшаясь от долин рек к водоразделу [105]. Питание горизонта осуществляется на значительном удалении от области исследований в местах размыва регионального водоупора, представленного чеганскими глинами.

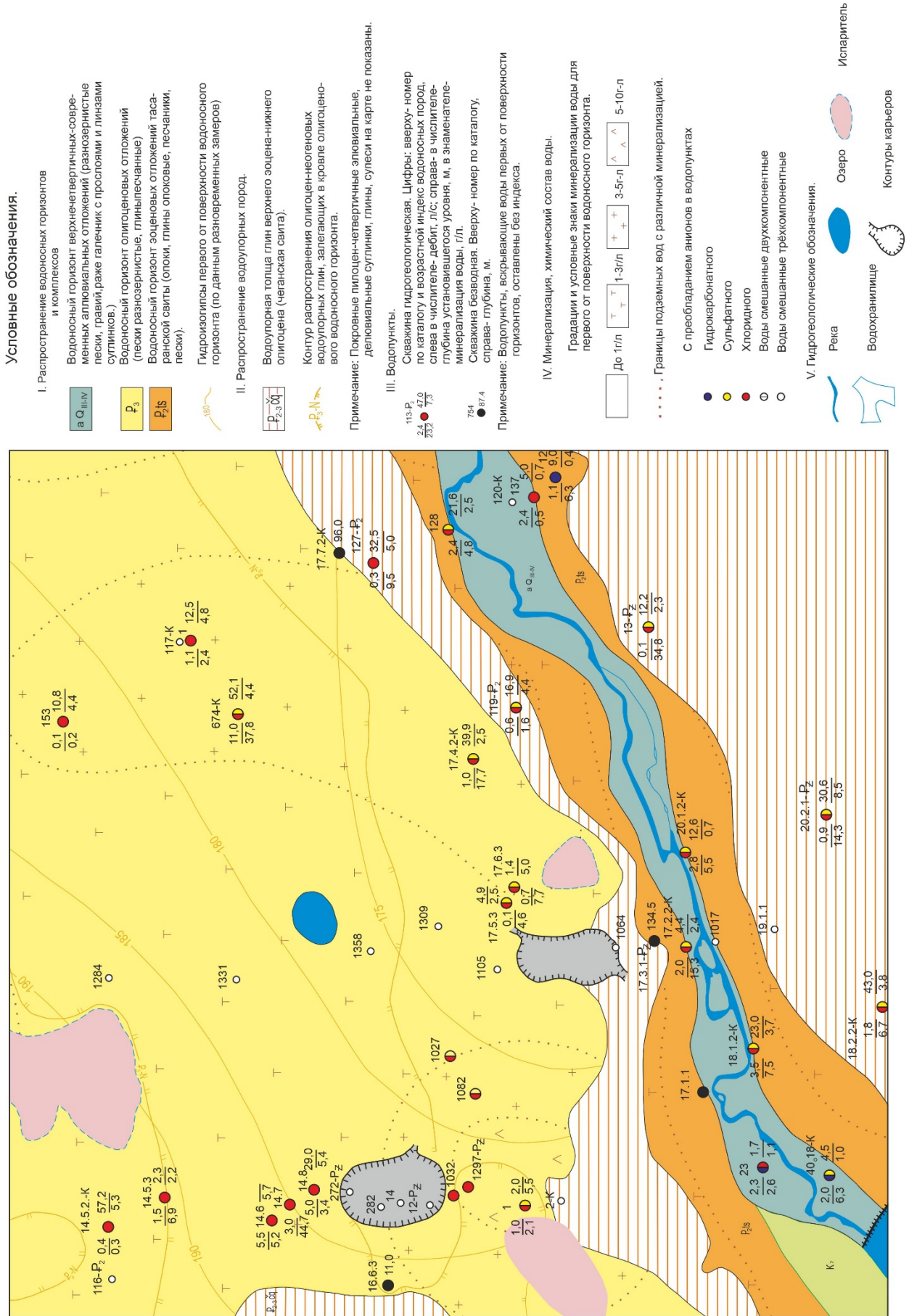


Рисунок 2.2 – Гидрогеологическая карта района исследований

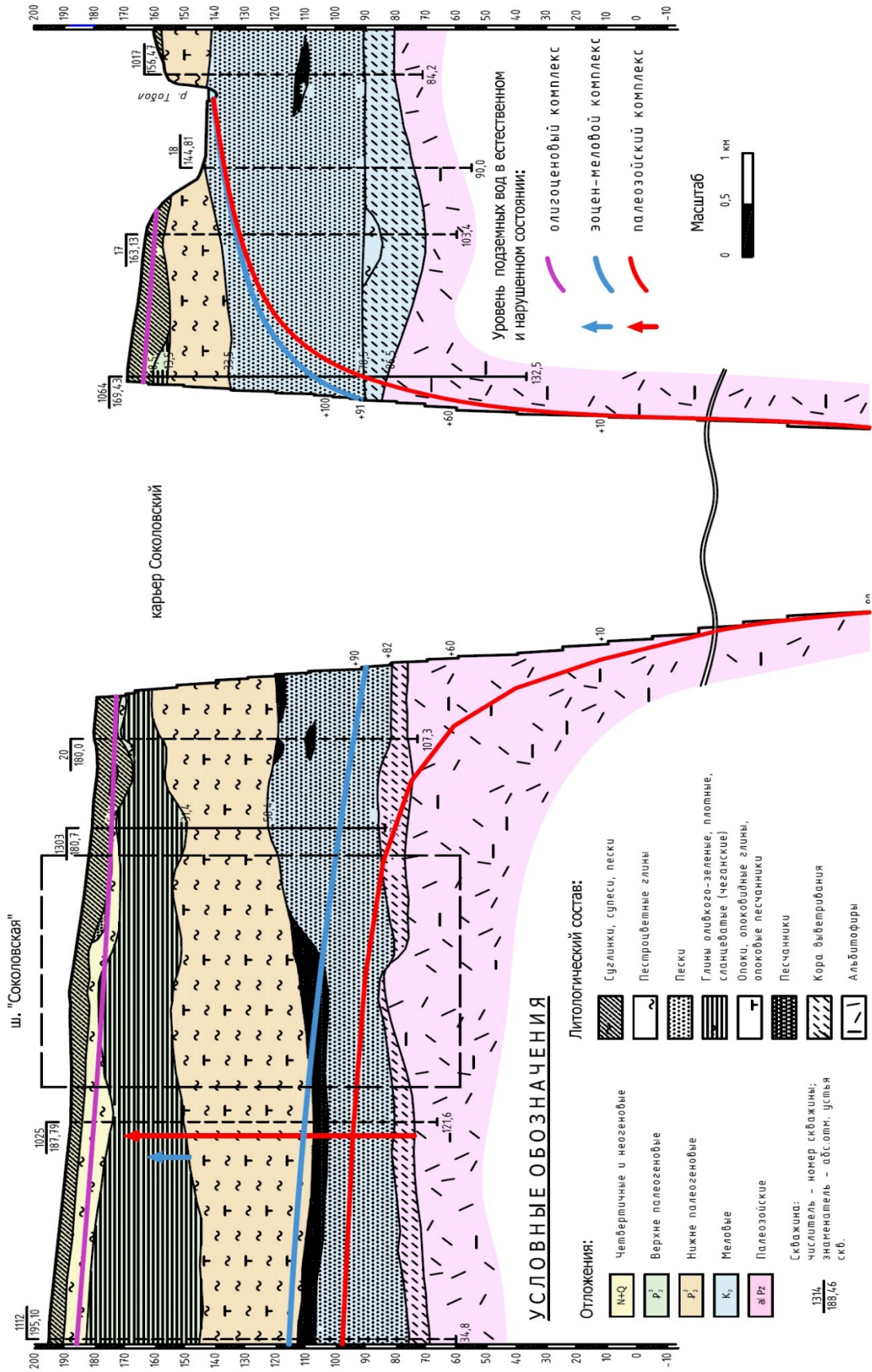


Рисунок 2.3 – Продольный гидрогеологический разрез Соколовского месторождения в направлении север-юг

В районе Соколовского месторождения слой маастрихтских глин отсутствует, поэтому эоценовый и меловой горизонты рассматриваются как единый эоцен-меловой комплекс.

Эоцен-меловой водоносный комплекс является основным источником обводнения горных выработок. На открытом дренаже карьеров Соколовско-Сарбайской группы месторождений водоприток из мелового комплекса составляет до 70% от общего водопритока.

6. Кора выветривания состоит из лигнитовых глин, мощность значительно колеблется: от нуля до десятков метров. Мощность кор выветривания резко возрастает в зонах разрывных нарушений и достигает до 150 м. Кора выветривания является относительным водоупором, связь эоцен-мелового комплекса с нижележащим палеозойским комплексом осуществляется через гидрогеологические окна в местах залегания песков на палеозойском фундаменте.

Комплекс магматических пород

Палеозойский водоносный комплекс развит повсеместно и включает несколько стратиграфических подразделений нижнего палеозоя, силура, девона, карбона.

Скальные породы палеозойского комплекса представлены эффузивно-осадочной толщей, сложенной андезитовыми и базальтовыми порфиритами, их туфами и туфобрекчиями, реже известняками и туффитами нижнего карбона. Породы прорваны интрузиями диоритов и диабазовых порфиритов. К контактам эффузивно-осадочных и интрузивных пород приурочено оруденение и образование метасоматических пород.

Все породы палеозойского возраста имеют северо-северо-восточное простирание, и преимущественно, восточное падение под углами от 55° до 35°. Подошва выветрелых трещиноватых пород колеблется в широких пределах. Абсолютные отметки изменяются от +16,0 м до +88,0 м. Зоны максимального понижения в рельефе наблюдаются на западе месторождения.

Подземные воды приурочены к верхней трещиноватой зоне, где развита открытая трещиноватость до глубины 140-160 м в эффузивно-осадочных породах, в зонах тектонических нарушений до глубины 220 м и более. Коэффициент фильтрации пород изменяется с глубиной – в верхней части, мощностью 50 м, составляет 0,085 м/сут, ниже в средней части, мощностью 50 м, уменьшается до 0,005 м/сут, в нижней ненарушенной зоне до 0,0005 м/сут.

Результаты опробования скважин испытателем пластового давления [105] показали, что притоки возможны и на глубинах свыше 1000 м, однако водообильность пород очень низкая.

2.1.3 Горно-техническая характеристика

Северный участок Соколовского месторождения разрабатывается этажно-камерной системой разработки. Стволы располагаются на западе, в лежащем боку месторождения. Отметка поверхности в районе месторождения составляют около 190 м. Месторождение вскрывается 5 комплексами, на отметках -60 м, -120 м, 190 м, -260 м, -330 м, -400 м. Первые три комплекса отработаны, комплекс -260 м отработан почти полностью, дорабатываются прибортовые целики. На данный момент очистные работы ведутся в основном на комплексе 330 м. Таким образом, текущая глубина работ составляет около 500 м.

Строительство рудника началось в 1968 г., согласно первоначальному проекту, месторождение должно было отрабатываться системой с обрушением. Для обеспечения безопасности работ в условиях обводненного эоцен-мелового комплекса было принято техническое решение об опережающем осушении массива с помощью внешнего дренажного контура.

На момент сдачи рудника в эксплуатацию в 1977 г. задача по осушению эоцен-мелового комплекса оказалась нерешенной, остаточные напоры составляли более 20 м. В связи с этим в соответствии с решением министерства черной металлургии были изменены проектные решения, и разработка месторождения осуществлялась с закладкой выработанного пространства.

Практика отработки показала, что инженерно-геологические условия на месторождении не позволяют осуществлять полноценный цикл работ с закладкой

очистного пространства. Низкая устойчивость выветрелых пород кровли приводит к неконтролируемому самообрушению и выходу на земную поверхность шахтного поля воронок обрушения до осуществления комплекса закладочных работ. Формируется техногенный массив с повышенными фильтрационными и емкостными характеристиками массива. Таким образом, цель закладочных работ – обеспечение безопасности работ оказывается недостигнутой.

К 1997 г. практика добычи на ш. «Соколовская» показала:

- на поверхность рудного поля вышло не менее 20 воронок обрушения.
- фильтрационный режим эоцен-мелового комплекса в целом приблизился к стационарному состоянию, уровень остаточных напоров уменьшился до 5-15 м.

Эти факторы наряду с экономическими соображениями обусловили возврат к системе разработки с обрушением.

Текущее горнотехническое состояние рудника характеризуется следующими условиями:

- наличие обширной зоны обрушения сложного строения, в которой дезинтегрированный массив с измененными фильтрационными свойствами внутри воронок обрушения (более 110 воронок по состоянию на 2018 г.) перемежается участками, сохранившими естественное залегание [106, 107].

- периодические прорывы пластичных обводненных пород и подземных вод из области обрушения создают угрозу безопасности горных работ и приводят к ухудшению механических свойств руды и нарушению горнотехнического цикла [108].

- постепенная деградация дренажной системы создает опасность увеличения водопритоков к дезинтегрированному массиву зоны обрушения и увеличению опасности прорывов.

2.1.4 Строение системы осушения Соколовского месторождения

Дренажная система шахты «Соколовская» состоит из внешнего и внутреннего дренажных контуров, которые дренируют воды основных водоносных комплексов.

Внешний дренажный контур состоит из горных выработок на комплексе +33 м, пройденных в верхней нарушенной зоне палеозойских пород и оборудованных сквозными фильтрами и восстающими скважинами, которые дренируют эоцен-меловой и палеозойский водоносные комплексы (Рисунок 2.4).

Шахтные воды внешнего дренажного контура собираются и откачиваются насосной станцией ствола "Южный - Вентиляционный" в водоотводной канал на земной поверхности.

Бурение сквозных фильтров производилось с 1971 по 1976 гг. с шагом между скважинами 100 м. Всего пробурено 87 скважин. В дальнейшем, по мере выбытия из строя, бурились новые дренажные устройства. По состоянию на 1.01.2020 г. на внешнем контуре в работе 170 восстающих скважин со средним дебитом 0.8 м³/ч. Всего за время эксплуатации внешнего дренажного контура пробурено около пятисот скважин.

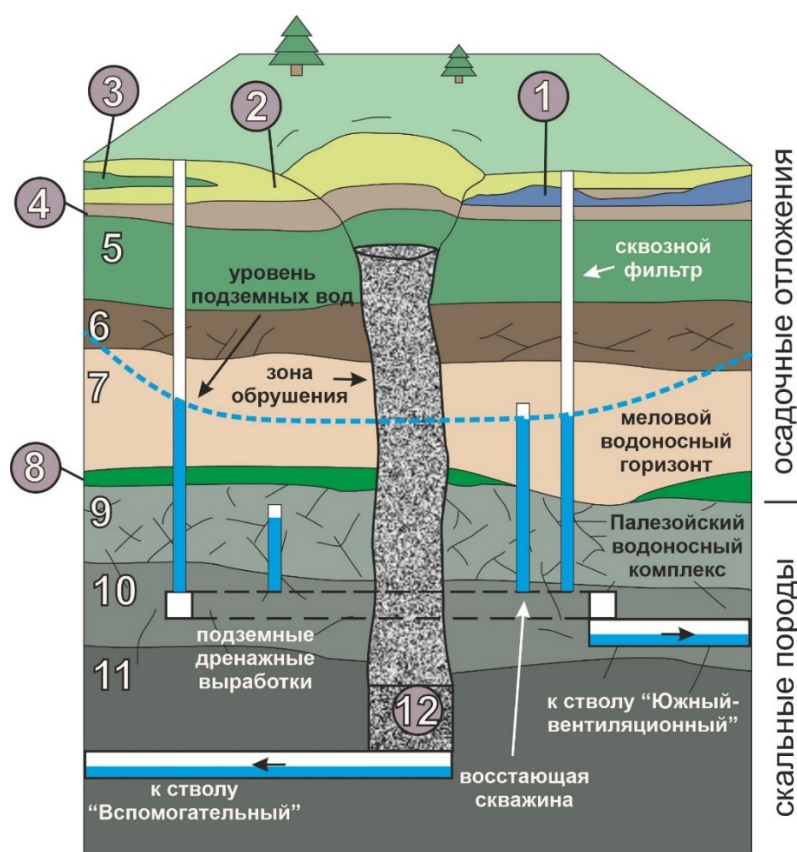


Рисунок 2.4 – Схема дренажного комплекса ш. “Соколовская”. Цифрами обозначены: 1) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) с низкой трещиноватости, 2) Скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) средней трещиноватости, 3) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) высокой трещиноватости, 4) кора выветривания палеозойских пород, 5) меловые пески, 6) опоки эоценовые, 7) глины чеганские, 8) пески олигоценовые, 9) пески четвертичные, 10) суглинки четвертичные, 11) супеси четвертичные, 12) дезинтегрированный массив

Внутренний дренажный контур включает сквозные фильтры на комплексе - 60 м, восстающие скважины на комплексе 0 м, все горные выработки и разведочные скважины, дренирующие воды эоцен-мелового и палеозойского водоносных комплексов, а также дезинтегрированный массив зоны обрушения.

Воды внутреннего контура собираются в водосборник, состоящий из трех независимых секций с общей емкостью 5.4 тыс. м³, и поднимаются на поверхность с помощью насосной станции ствола "Вспомогательный", оборудованной шестью насосами, производительность каждого составляет 300 м³/ч.

2.1.5 Распределение фильтрационных потоков к дренажной системе ш. "Соколовская"

Вокруг месторождений Соколовско-Сарбайского комплекса сформированы две депрессионные воронки, имеющими общую границу. Одна из них сформирована карьером Сарбайский, другая сложилась в результате совместного воздействия карьера Соколовский и ш. "Соколовская" на естественный фильтрационный режим. Каждая из депрессионных воронок включает, соответственно, воронки в эоцен-меловом и палеозойском водоносных комплексах, отрыв между уровнями подземных вод в них по контуру месторождений составляет 5–20 м.

Таблица 2.1 – Водоприток к дренажной системе ш. "Соколовская" с 2007 г. по 2018 г.; м³/ч

Показатели	Приток из внешнего дренажного контура	Приток из выработок в палеозойском комплексе	Приток из зоны обрушения	Общий приток
Сред. знач.	164.3	46.7	78.6	289.6
Медиана	157.3	45.9	84.0	289.9
Станд. откл.	16.3	3.6	17.3	10.8
Диапазон	44.5	11.0	49.5	37.0
Минимум	146.7	43.4	47.8	273.8
Максимум	191.2	54.4	97.3	310.8
Кол-во лет	11	11	11	11

На текущий момент фильтрационный режим вокруг объектов ССГПО (Соколовско-Сарбайское Горно-обогатительное производственное объединение) является стационарным (Рисунок 2.5). Величина водопритоков ко всем объектам постоянна. Стандартное отклонение ежемесячного водопритока к ш. «Соколовская» за 11 лет наблюдений с 2007 по 2018 гг. составляет $10.8 \text{ м}^3/\text{ч}$ при среднем значении $289 \text{ м}^3/\text{ч}$, Таблица 2.2. Аналогичные значения наблюдаются для имеющихся данных по Сарбайскому карьеру и ш. «Соколовская». На момент исследований состояние водопритока к дренажной системе ш. «Соколовская» следующее (данные 2018 г.):

- водоприток к внешнему дренажному контуру (выработкам комплекса +33 м) – $151 \text{ м}^3/\text{ч}$, из них $140 \text{ м}^3/\text{ч}$ от скважин и фильтров, дренирующих эоцен-меловой водоносный комплекс, $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ – из скважин, дренирующих палеозойский водоносный комплекс;

- водоприток к внутреннему дренажному контуру – $141 \text{ м}^3/\text{ч}$, соответственно: из мелового комплекса $3 \text{ м}^3/\text{ч}$, из скважин и выработок в палеозойском водоносном комплексе $41 \text{ м}^3/\text{ч}$, и из зоны обрушения $97 \text{ м}^3/\text{ч}$.

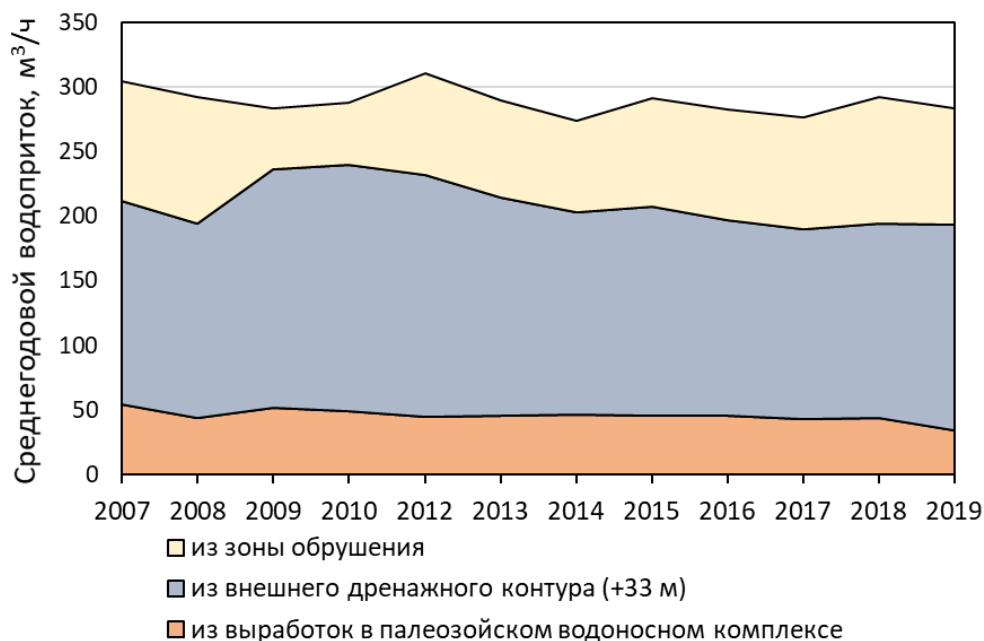


Рисунок 2.5 – Водоприток к дренажной системе ш. «Соколовская» с 2007 г. по 2018 г., $\text{м}^3/\text{ч}$

Таким образом, водоприток к ш. “Соколовская” составляет около 290 м³/ч, при этом водоприток из области дезинтегрированного массива составляет 33% от общего водопритока. Данные наблюдений по карьерам показывают, что доля притока из эоцен-мелового комплекса составляет около 70%.

С целью установления связи между притоками к внешнему дренажному контуру и притоку к зоне обрушения был проведен факторный регрессионный анализ. Анализируются усредненные годовые значения водопритоков. В качестве зависимой переменной использовались значения водопритока к зоне обрушения, в качестве независимой – водоприток к внешнему дренажному контуру, Рисунок 2.6

Анализ водопритков к дренажной системе ш. Соколовская показывает наличие зависимости, которая выражается линейной функцией:

$$Q_{зо} = 0.84541 * Q_{вн.} + 217,$$

где $Q_{зо}$ – водоприток к зоне обрушения,

$Q_{вн.}$ – водоприток к внешнему дренажному контуру

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.63$.

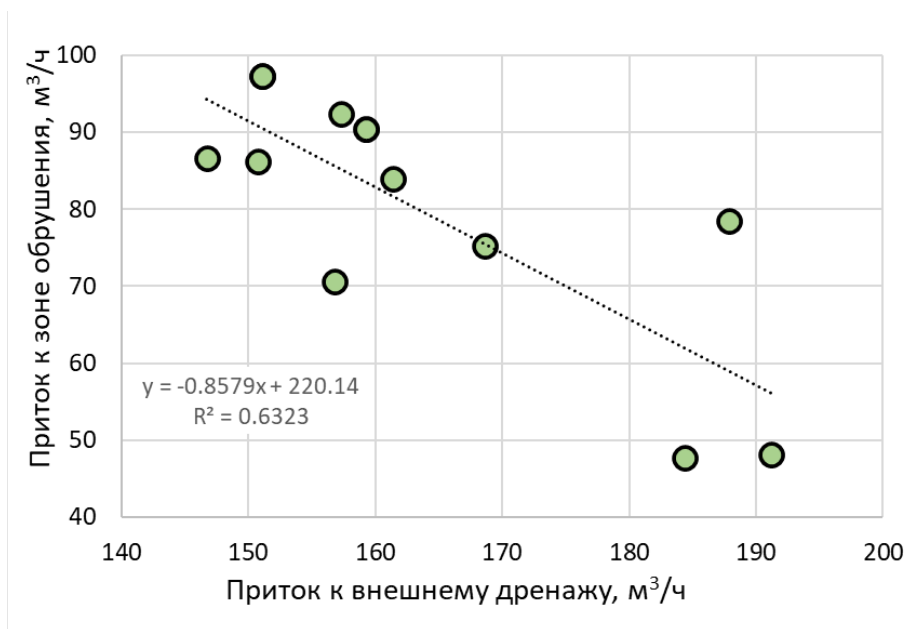


Рисунок 2.6 – Диаграмма рассеяния данных мониторинга водопритоков к дренажу ш. “Соколовская”

Анализ показывает: существует обратная связь между водопритоками к зоне обрушения и притоком к дренажному контуру на гор. +33 м. При изменениях режима подземных вод, вызванных внешними факторами (условиями питания и

др.), изменения водного баланса или увеличения производительности дренажного комплекса, увеличение притока к внешнему дренажу вызывает уменьшение притока к зоне обрушения.

2.2 Характеристика распределения прорывов из зоны обрушения Соколовского месторождения

2.2.1 Строение зоны обрушения ш. “Соколовская”

Зона обрушения шахтного поля Соколовского месторождения представляет собой область площадью 480 тыс. м², размерами около 1500 м в длину и 600 м в ширину, ориентированную субмеридионально, отклоняясь на 14 градусов в северо-восточном направлении [109]. Формирование зоны обрушения началось в 1981 г. с появлением первой воронки при отработке на горизонте выпуска -60 м. Всего при отработке комплекса -60 м зафиксировано 6 воронок диаметром от 27 до 50 м.



Рисунок 2.7 – Состояние земной поверхности ш. “Соколовская” в 2017 г.

Во время разработки месторождения с закладкой выработанного пространства до 1998 г. воронки засыпались скальными породами. За это время на поверхности появилось 25 воронок от выемочных единиц комплексов -60 м, -120 м и -190 м (Рисунок 2.8). Наблюдается продолжение процесса объединения воронок. Зона воронкообразования на поверхности ш. «Соколовской» делится на четыре области, Рисунок 2.9. Деление обусловлено расположением рудных тел и существующих очистных блоков комплексов -60 м, -120 м, -190 м, -260 м и -330 м [110]. В рамках работы этим группам воронок присвоены имена латинских букв от А до D.

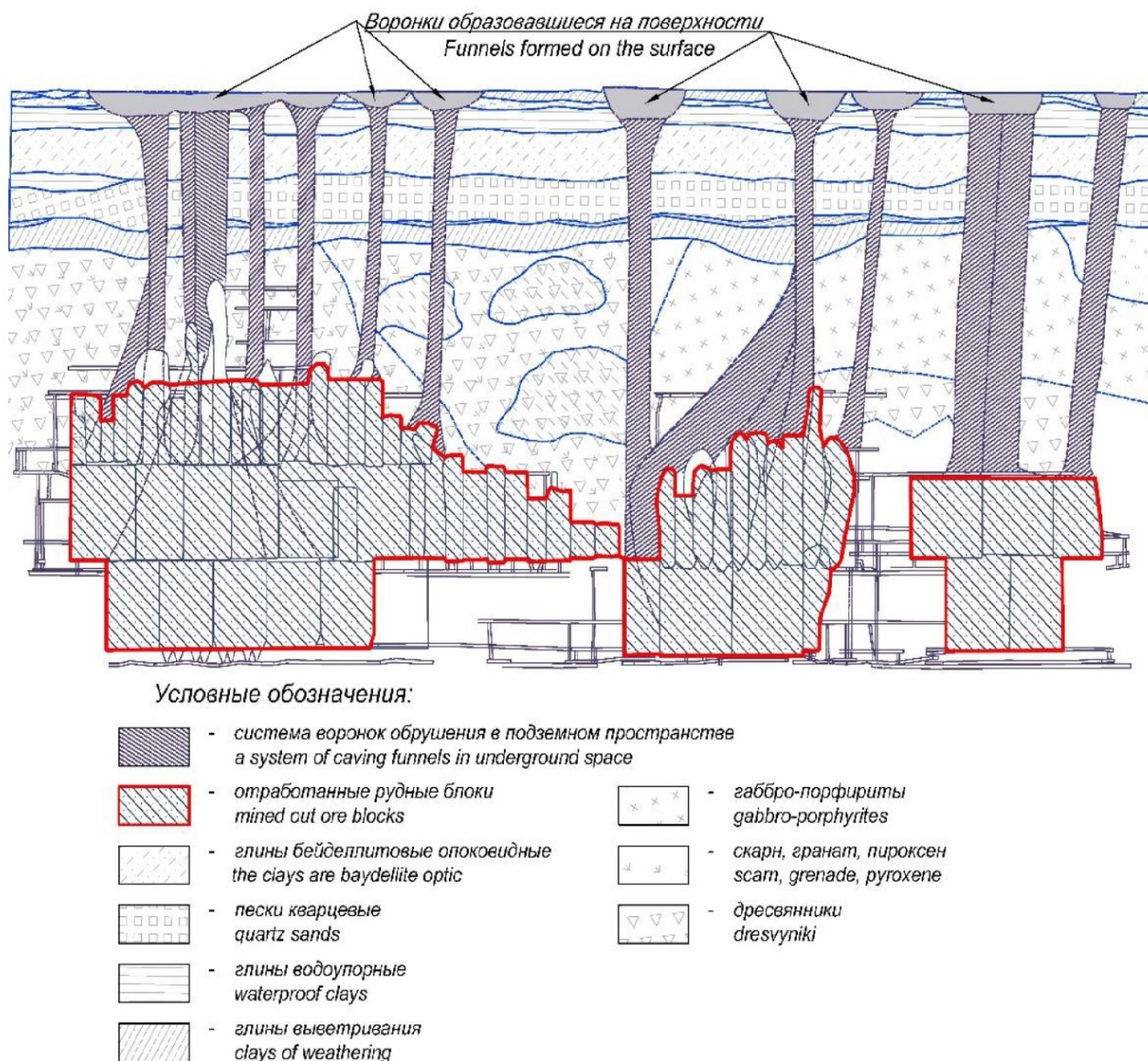


Рисунок 2.8 – Развитие зоны обрушения в результате отработки первых трех рабочих комплексов: -60 м, -120 м и -190 м [60].

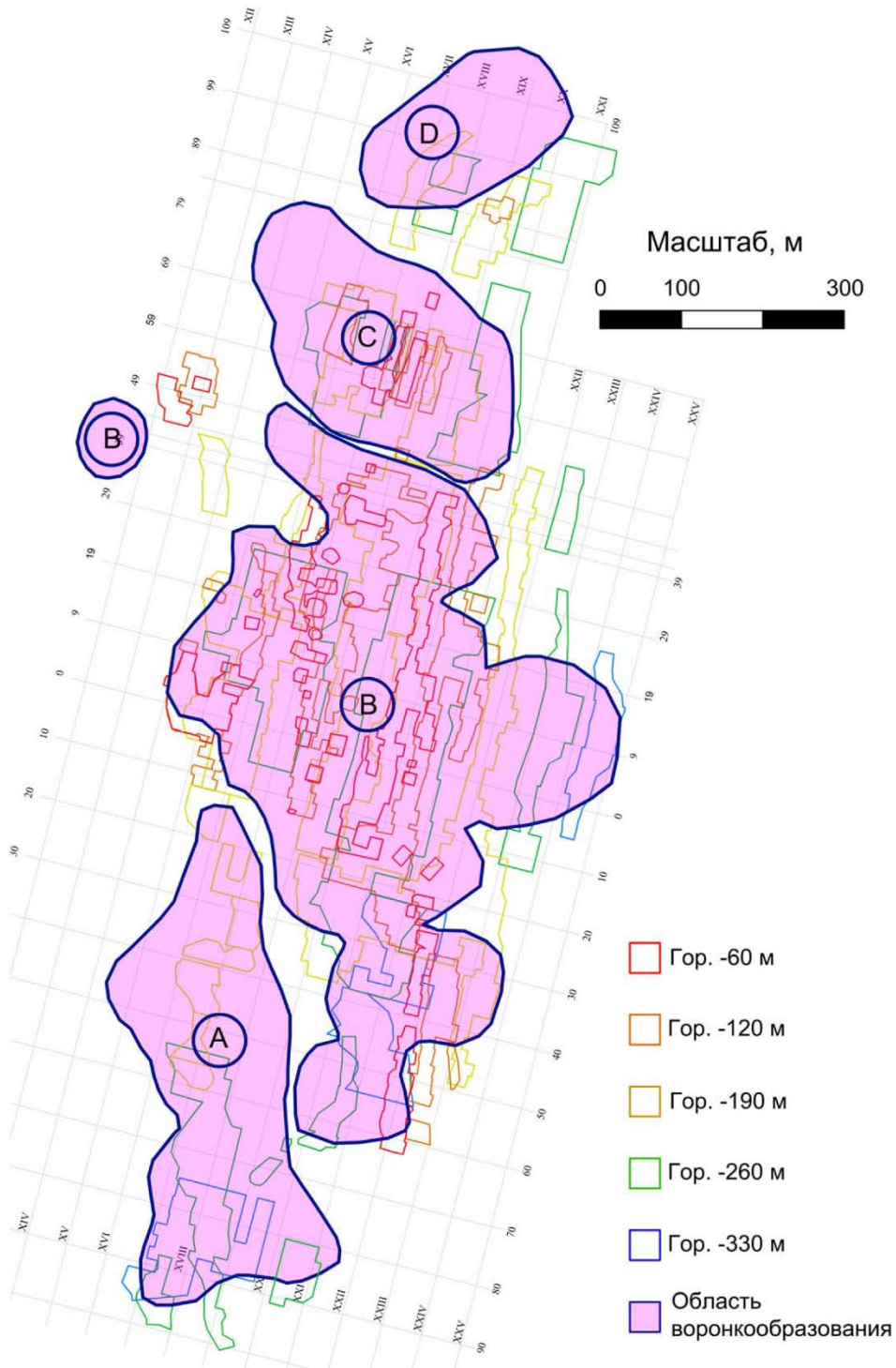


Рисунок 2.9 – Зона воронкообразования Соколовского месторождения

На текущий момент строение массива горных пород, конфигурация рудных тел и развитие горных работ привели к тому, что обрушенные осадочные горные породы - пески, суглинки и глины, многократно перемешанные между собой и скальными породами, оказались расположены ниже основных водоносных

комплексов и периодически в ходе цикла горных работ, смешиваясь с водой, прорываются в горные выработки.

2.2.2 Распределение прорывов из зоны обрушения Соколовского месторождения

Целью анализа наблюдаемых случаев прорывов осадочных отложений является классификация и определение закономерностей пространственного распределения прорывов, а также выявление взаимосвязей с особенностями геоморфологии водоносных комплексов в окрестностях рудного поля. Исходными данными для анализа служили результаты мониторинга прорывов осадочных отложений, фиксирующие дату, локализацию выходов отложений, их вещественный состав и характеристику. Всего проанализировано более 250 (включая многократные) случаев прорывов, произошедших за период с 2002 г. по 2018 г.

Известна классификация прорывов обводненных масс ВИОГЕМ [44]. В качестве классифицирующего параметра авторами используется объем обводнённых глинистых отложений. Пороговыми значениями, для отнесения к той или иной категории выступает объем прорывов 100 и 1000 куб. м. Однако она обладает недостатком: границы категорий соответствуют разрядам десятичной системы счисления и не отражают масштаб влияния прорывов природно-техногенную систему.

В рамках работы была разработана усовершенствованная классификация, с целью отражения влияния прорывов на технологический процесс добычи. В качестве классифицирующего критерия используется объем пород, прорвавшихся на рабочий комплекс, в соответствии с влиянием, оказываемым на процесс погрузки и транспортировки рудной массы.

Прорывы классифицированы на три категории. К первой категории относятся масштабные выходы отложений (прорывы глинистых отложений, ПГО), вызывающие закрытие скреперных выработок и/или проникающие в зону откаточных выработок. Как правило, такой прорыв вызывает закрытие откаточных выработок на несколько дней или недель. Ориентировочные объемы прорывов превышают сотню и могут достигать нескольких тысяч кубических метров. Вторая

категория включает выходы отложений, влияющие на работу одной скреперной выработки, в т. ч. вызывающие перекрытие одной или нескольких выпускных воронок. Максимальный объем вышедших ПГО, попавших во вторую категорию, составляет первые десятки кубических метров. Третья категория включает появление глинистых отложений в составе руды, добываемой из очистной единицы, практически не влияющих на очистные работы. Максимальный объем отложений, попадающий в третью категорию, не превышает нескольких кубических метров, (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Классификация прорывов глинистых отложений на комплексы выпуска

Категория	Минимальный; максимальный объем, м ³	Ориентировочный средний объем, м ³	Характеристика	Кол-во событий
I	(100;40000)	520	Обводненные пластичные породы полностью заполнили скреперную выработку, а также вышли за ее пределы и привели к нарушению работы откаточной выработки и/или вызвали необходимость ликвидации скреперной выработки путем возведения перегородок для остановки проникновения.	21
II	(8;100)	60	Обводненные пластичные породы значительно заполнили скреперную выработку, вызвали остановку выпуска руды выработкой на значительный срок или вызвали необходимость ликвидации одной и более воронок выпуска путем перекрытия	18
III	(0;8)	4	Обводненные пластичные породы появились в составе выпускаемой руды или скальных пород, и оказали влияние на выпуск руды одной или нескольких выпускающих воронок	19(58)*

* Без скобок – количество независимых событий, зарегистрированных в различных очистных единицах, в скобках количество связанных событий, включающих повторные выходы отложений в одной очистной единице.

В связи с тем, что объём выходов ПГО в журнале не фиксировался, ориентировочный средний объём определен по экспертным оценкам на основе габаритов выработок [15].

Анализ распределения прорывов показал, что как правило большая часть прорывов на каждом комплексе выпуска происходит при отработке первых очистных камер в пределах одного рудного тела. При отработке первых камер формируются локальные каналы для проникновения обводненных пластичных пород в нарезные выработки. При дальнейшей отработке блока, риск прорывов может снижаться, так как часть наиболее текучих пород вышла на комплекс через эти сформированные каналы, уменьшая общий потенциал прорывов. Это обуславливается системой вскрытия и последовательностью отработки очистных выработок. Полученные результаты анализа хорошо согласуются с экспериментами ВИОГЕМ [36].

Анализ пространственного распределения прорывов показывает зависимость с одной стороны от формы зоны обрушения, и с другой стороны от водопритоков к рудным блокам.

В связи с тем, что земная поверхность многократно подрабатывалась очистными работами на разных комплексах, зона обрушения содержит большое количество повторных воронок, вышедших в существующие. В результате этого зона обрушения представляет собой четыре относительно независимые группы воронок.

Рисунок 2.10 изображает комплексы выпуска, на которых фиксировались положения выходов отложений, их категории и положение групп воронок на земной поверхности. Из рисунка видно, что более 70% выходов ПГО первой категории локализуются в нескольких очистных единицах комплексов -190 м и -260 м, расположенных на двух участках месторождения. Первый из участков включает очистные единицы, расположенные в центральном рудном теле. Вторым из участков расположен на северном фланге месторождения, в пределах рудных тел 3В Север и 4В Север. Этим участкам соответствуют две объединенные группы

воронки. Выходы воронок на поверхность отклоняются на запад, в сторону лежащего бока, вследствие наклонного строения рудного тела.

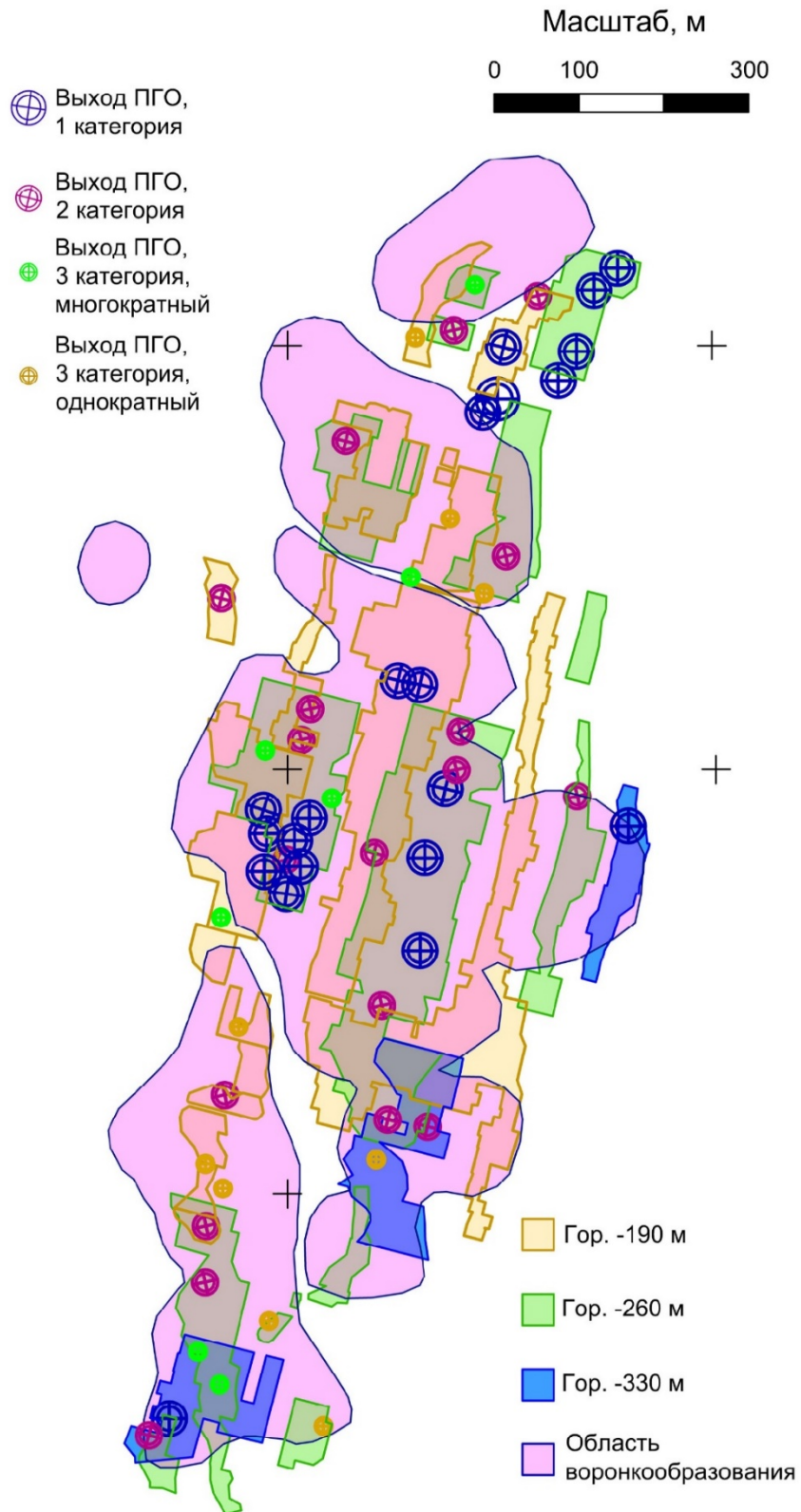


Рисунок 2.10 – Пространственное распределение прорывов глинистых отложений (ПГО) в горные выработки ш. “Соколовская”

Рисунок 2.11 содержит диаграмму рассеяния *удельных объемов* выходов отложений и *удельных среднегодовых водопритоков* по участкам рудного поля. Под *удельным объемом* полагается отношение объема отложений, прорвавшихся на комплексы выпуска в рудном блоке, к общей площади зоны обрушения, образованной отработанными очистными выработками этого же рудного участка. Выделяются две участков и зон обрушения, сформированных при их отработке: в первой группе (выделенной синим цветом), с увеличением *удельного объема* водопритоков на участке увеличивается *удельный* объем прорывов из зоны обрушения. К первой группе относятся рудные тела, разрабатываемые в течение длительного времени, с давно сформированной зоной обрушения и активным перемешиванием пород в ее пределах. Ко второй группе относятся рудные тела, разработка которых началась значительно позднее. Во второй группе (выделенной красным цветом) взаимосвязи между количеством водопритоков и объемами прорывов не прослеживается. При этом и наибольший удельный объем, и наиболее негативное влияние на процесс добычи руды фиксируются в наиболее обводненных участках рудного поля.

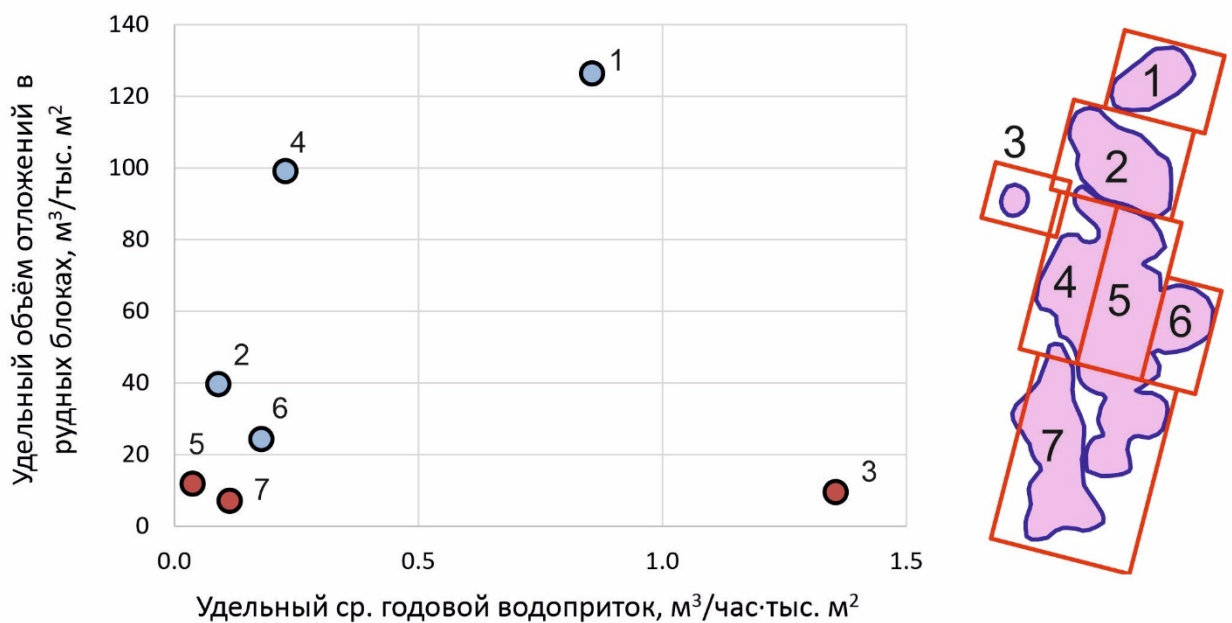


Рисунок 2.11 – Диаграмма рассеяния удельного объема отложений, вышедших в горные выработки из зоны обрушения

Всего на поверхности месторождения присутствуют четыре группы объединенных воронок, однако большинство выходов ПГО связаны лишь с двумя из них [111]. По-видимому, причина концентрации прорывов отложений связана с особенностями водного питания зоны обрушения. Для выявления источников водопритоков в область обрушения привлечены данные мониторинга гидрогеологических скважин и морфологические данные подошвы водоносных комплексов.

Анализ данных наблюдательных скважин в олигоценовом водоносном горизонте, расположенном на отметке 176 м показал, что водоприток в области обрушения имеет равномерный характер по всей площади обрушения, не может служить источником повышенного водного питания групп воронок северной и центральной. Подошва олигоценового горизонта, сложенная чеганскими глинами, является относительно пологой, абсолютный перепад высот на протяжении большей части исследуемой территории лежит в пределах 8-10 м в сторону Соколовского карьера, (Рисунок 2.3). В окрестностях шахтного поля морфология подошвы песков имеет эрозионный рельеф, выделяется разветвленная балочная форма, с уклоном на юг, в направлении р. Тобол и Соколовского карьера. Кроме того, мощность водонасыщенной части песков составляет 3 м, а коэффициент фильтрации 1 м/сут, что не позволяет водоносному комплексу быть основным источником притока к месторождению.

Эоцен-меловой комплекс значительно более обводнен. На начальных этапах разработки режим фильтрации имел напорный характер. Уровень напора до начала разработки был на отметке 148-150 м. На текущий момент отметки напора вблизи зоны обрушения составляют около 90-100 м, таким образом, мощность зоны насыщения по периметру зоны обрушения составляет от 5 до 15 м.

Эти данные согласуются с результатами наблюдений за водопритоками к Соколовскому и Сарбайскому карьере, где вклад эоцен-мелового комплекса обеспечивает до 70% общего водопритока к дренажной системе.

Рисунок 2.12 отражает морфологию подошвы эоцен-мелового комплекса, на которой присутствуют контур воронок обрушения и распределение прорывов осадочных отложений. Из рисунка видно, что рельеф комплекса сложный, имеются многочисленные возвышенности и впадины. Несмотря на существующий дренаж, уровень подземных вод над подошвой комплекса достаточный, чтобы обеспечить значительный приток к зоне обрушения. Приток формируется через седловидные понижения между локальными повышениями рельефа.

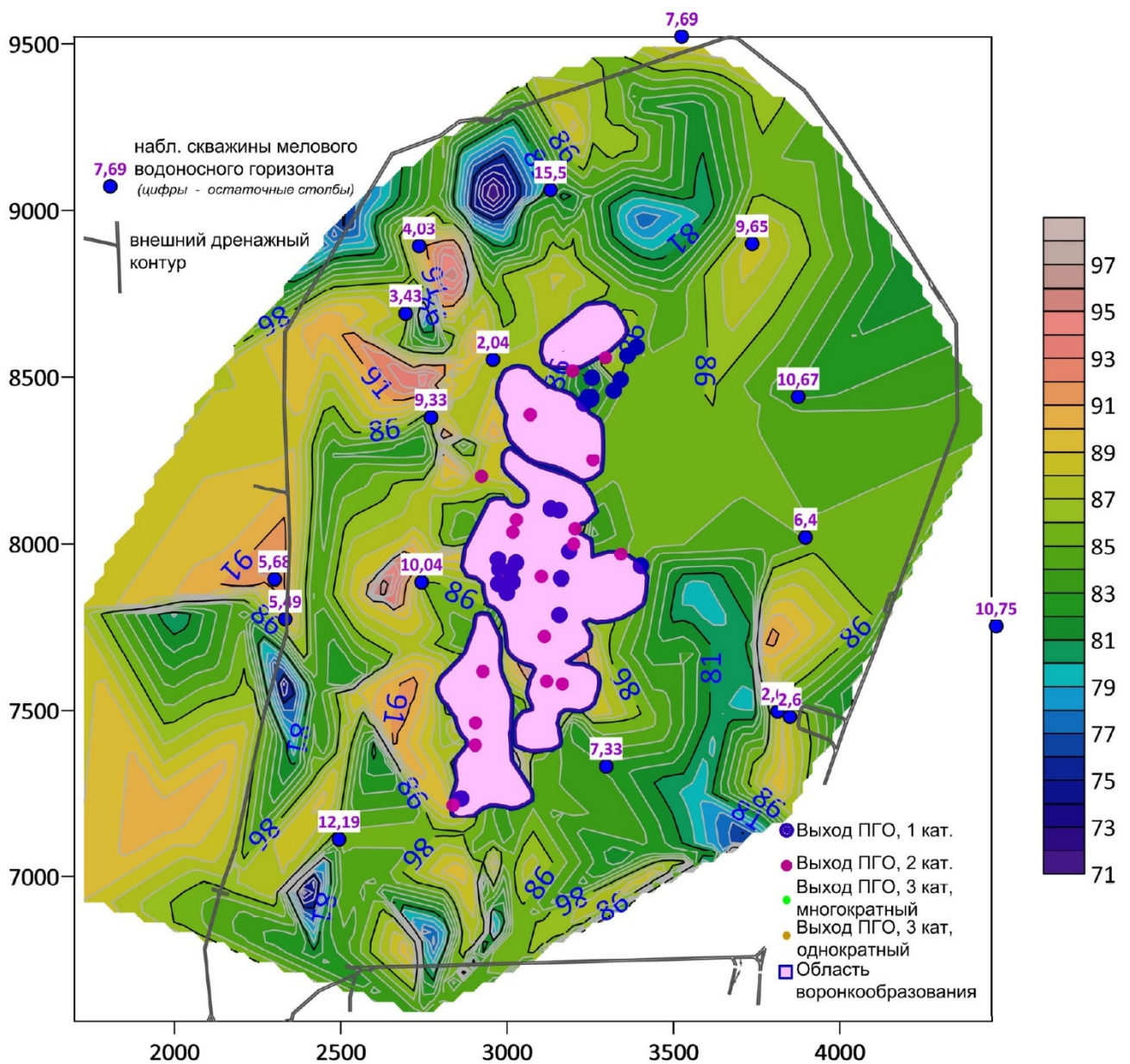


Рисунок 2.12 – Морфология подошвы эоцен-мелового комплекса, *справа шкала отметок морфологии подошвы*

Вместе с тем имеются понижения рельефа, на рисунке они соответствуют областям синего и голубого цвета. При размещении в них дренажных устройств есть возможность значительно понизить уровень подземных вод и снизить приток к зоне обрушения, т.к. их отметки ниже отметок подошвы комплекса на границе зоны обрушения. Подробнее вопрос будет рассмотрен в главе 4 (Рисунок 4.1).

2.3 Выводы

Отработка северного фланга Соколовского месторождения системой с обрушением кровли в условиях вышележащих обводненных пород артезианского бассейна является примером работ в сложных гидрогеологических условиях. Слабая устойчивость выветрелых коренных пород палеозойского комплекса ведет к формированию области дезинтегрированного массива обрушенных пород над очистным пространством. Вследствие конфигурации рудных тел северного фланга зона обрушения состоит из четырех групп объединенных воронок обрушения.

Наличие в области дезинтегрированного массива большого объема глинистых пластичных пород в условиях обводнения водами вышележащего артезианского бассейна приводит к прорывам глинистых отложений на комплексы выпуска.

Проведенные исследования позволили классифицировать аварии по масштабу проявления и степени влияния на технологический процесс. Около 70% аварий 1 категории (наиболее крупных) приурочено к северной и центральной группам воронок, отличающихся повышенными притоками. Прорывы связаны с циклом очистных горных работ. Большая часть прорывов на каждом комплексе выпуска происходит при отработке первых очистных камер в пределах рудного тела. Эти наблюдаемые данные объясняются системой разработки и последовательностью отработки очистных выработок, согласуются с механизмом возникновения прорывов, смоделированным с помощью эквивалентных материалов [88, 33, 36, 112].

Отсюда следует 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.

Эоцен-меловой водоносный комплекс обеспечивает до 70% притока к объектам ССГПО. Наличие внешнего дренажного контура Соколовского месторождения обеспечивает частичное осушение эоцен-мелового комплекса, но недостаточное, чтобы нарушить гидравлическую связь дезинтегрированного массива с эоцен-меловым комплексом. На текущий момент приток к зоне обрушения составляет около 33% от общего притока к дренажной системе ш. “Соколовской”.

Проведенные исследования показывают обратную зависимость между среднегодовыми притоками к дезинтегрированному массиву зоны обрушения и внешнему дренажному контуру.

Отметка уровня подземных вод эоцен-мелового комплекса в области рудного поля составляет в среднем 95 м. В эоцен-меловом комплексе по периметру зоны обрушения сохраняются остаточные столбы высотой около 5-15 м, сохраняется питание дезинтегрированного массива водами комплекса. Это обусловлено неоптимальным расположением внешнего дренажного контура относительно морфологических особенностей 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 обоснования решения прогнозных задач (в связи со сложной геометрией, неоднородностью свойств, совокупным влиянием граничных условий), связанных

с осушением эоцен-мелового комплекса и обеспечением безопасности горных работ, необходимо разработать геогидродинамическую модель месторождения и установить зависимость между фильтрационными свойствами дезинтегрированного массива зоны обрушения, глубиной техногенной нарушенной зоны и притоками к комплексу выпуска. Эти задачи будут решены в следующих главах квалификационной работы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1 Математическая модель

Основное уравнение фильтрации

Для описания процесса фильтрации в системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения” в рамках исследований принята модель Дарси, широко используемая в гидрогеодинамических расчетах.

В рамках модели трехмерное движение флюида через пористую среду описывается основным уравнением фильтрации [113]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3.1)$$

где:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты фильтрации вдоль соответствующих осей,

h – гидравлический напор,

W – удельный объемный поток, представляющий приток и отток воды в систему (приток при положительном значении W)

S_s - коэффициент ёмкости пород.

Гидравлический напор - давление жидкости, выражаемое высотой столба жидкости над выбранным уровнем отсчёта, определяется:

$$h = \frac{p}{\gamma} + z, \quad (3.2)$$

где: p – гидростатическое давление,

γ – объемный вес воды,

z – отметка уровня напора (высота положения над плоскостью сравнения).

Уравнение описывает ламинарное движение жидкости в пористой среде. При этом исследователи [74] выделяют следующие границы применимости закона Дарси:

1. В горных породах с пористой проводимостью, верхний предел ламинарного течения определяется критическим значением безразмерного числа Рейнольдса, которое не должно превышать 7-9.

Число Рейнольдса для горных пород [114] определяется как:

$$R_e = \frac{1}{0.75n+0.23} \cdot \frac{v \cdot d_p \cdot \rho}{\mu}, \quad (3.3)$$

где

n – пористость грунта,

v – средняя скорость фильтрации,

d_e – эффективный размер зерна.

Практика показывает, что условие выполняется и закон Дарси применим в большинстве случаев фильтрации подземных вод.

2. Начальный градиент напора при движении воды в глинистых породах, с малым размером пор. Описывается условием:

$$v = \begin{cases} 0, & \text{при } \frac{\partial H}{\partial l} \leq I_n \\ -k \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial l} - I_n \right), & \text{при } \frac{\partial H}{\partial l} \geq I_n \end{cases}, \quad (3.4)$$

где k – коэффициент фильтрации,

$\frac{\partial H}{\partial l}$ – градиент напора,

I_n – начальный градиент напора

Иными словами, движение вод в глинах начинается, когда градиент напора превысит начальный градиент. При решении задач данное условие заменяют подбором удовлетворяющих значений фильтрационных свойств водоупорных слоев путем калибрации.

Уравнение (3.1) описывает поток грунтовых вод как нестационарное движение флюида в неоднородной анизотропной среде, в системе отсчета, где главные оси гидравлической проводимости совпадают с осями координат. Вместе с описанием условий потока и/или напора на границах системы водоносных комплексов и указанием условий начального напора оно составляет математическое представление потока грунтовых вод.

Аналитическое решение уравнения (3.1) представляет собой такую алгебраическую функцию $h(x, y, z, t)$, которая бы при подстановке производных от h по пространственным осям и времени удовлетворяла начальным и граничным условиям.

За исключением очень простых систем аналитические решения уравнения (3.1) редко возможны, поэтому на практике для получения приближенных решений используются подходы, реализующие различные численные методы. Одним из них является метод конечных разностей, в котором непрерывная система, описываемая дифференциальным уравнением, заменяется конечным набором дискретных точек в пространстве и времени, а частные производные заменяются членами, вычисленными из разностей значений гидравлического напора в этих точках.

Процесс решения сводится к системам линейных алгебраических разностных уравнений, которые позволяют получить значения гидравлического напора в известных точках для конкретных моментов времени. Эти значения представляют собой приближение к изменяющемуся во времени распределению напора в массиве горных пород, которое может быть получено с помощью аналитического решения дифференциального уравнения потока в частных производных.

Граничные условия

В связи с тем, что уравнение (3.1), как и все остальные дифференциальные уравнения, имеет не одно, а семейство решений, необходимо введение граничных и начальных условий. Начальные и граничные условия позволяют выбрать решение, соответствующее реальному физическому процессу. При решении задач динамики подземных вод граничные и начальные условия задают распределение напора или расхода.

Начальное условие характеризует распределение гидродинамических элементов в начальный момент времени [115], и обычно задается распределением напоров в моделируемом слое.

Граничные условия характеризуют параметры дифференциального уравнения на границе моделирования. В динамике подземных вод разделяют четыре вида граничных условий [115]:

1. Граничное условие первого рода определяет значение напора.

$$H = f(t) \quad (3.5)$$

Естественным границам области фильтрации, например, в водоносных комплексах, связанных с реками, свойственно изменение напора, при изменении уровня воды в русле, Рисунок 3.1

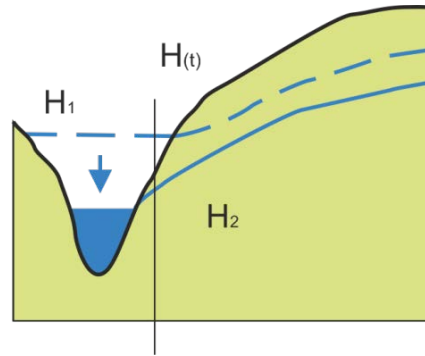


Рисунок 3.1 – Схема граничного условия первого рода на границе потока подземных вод: H_1 – начальный уровень подземных вод, H_2 – изменившийся уровень подземных вод вследствие изменения уровня воды в реке

Уровень напора при этом, в зависимости от целей и условий моделирования, задается как функция от времени или как средняя величина за отрезок времени. Частным случаем граничного условия первого рода является постоянный напор.

$$H = \text{const} \quad (3.6)$$

2. Граничное условие второго рода определяет расход подземных вод на границах области фильтрации

$$q_L = f(t) \text{ или } q_L = \text{const}, \quad (3.7)$$

где q_L – расход на границе фильтрации.

Напор подземных вод при этом может изменяться во времени. Рисунок 3.2 содержит пример схемы условия второго рода для дренажной скважины, при использовании погружных насосов условие постоянства расхода является обычным.

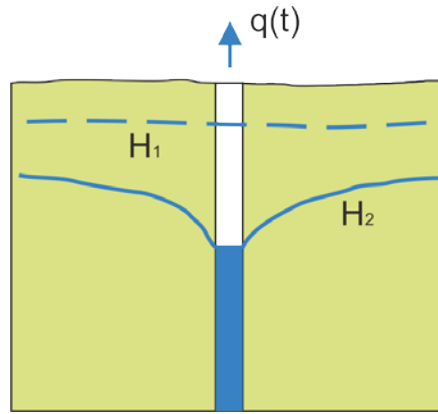


Рисунок 3.2 – Схема граничного условия второго рода: H_1 – начальный уровень подземных вод, H_2 – изменившийся уровень подземных вод вследствие откачки из скважины

Граничное условие третьего рода выражает линейную зависимость расхода подземных вод от разности напоров (Рисунок 3.3).

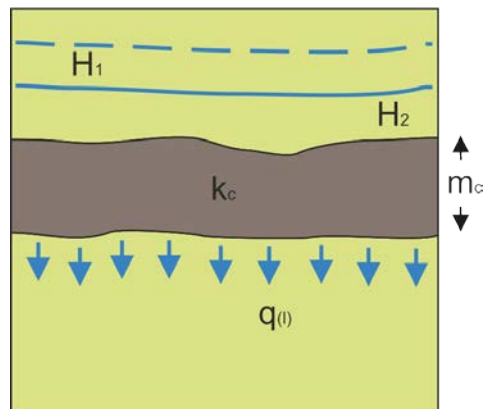


Рисунок 3.3 – Схема граничного условия третьего рода: H_1 – уровень подземных вод верхнего водоносного комплекса, H_2 – напор подземных вод нижнего водоносного комплекса. $q(l)$ – расход подземных вод, фильтрующихся через слабопроницаемый слой, k_c – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, m_c – мощность слабопроницаемого слоя.

Оно может иметь место при фильтрации подземных вод в дренажные каналы, русла рек. Примером также может служить фильтрация в системе водоносных комплексов, разделенных слабопроницаемым слоем, если выдерживается балансовое соотношение:

$$q_L = \frac{k_c}{m_c} (H_1 - H_2), \quad (3.8)$$

где q_l – расход, фильтрующихся через слабопроницаемый слой,

k_c – расход на границе фильтрации,

m_c – мощность разделяющего слоя,

H_1 – напор (уровень грунтовых вод) первого водоносного комплекса,

H_2 – напор второго водоносного комплекса.

Граничное условие четвертого рода характеризует взаимодействие двух разнородных комплексов (Рисунок 3.4). На контакте двух комплексов пород выполняется условие неразрывности:

$$H_{L1} = H_{L2}, q_{L1} = q_{L2}, \quad (3.9)$$

где q_{L1} – расход, подземных вод на границе фильтрации,

q_{L2} – расход, подземных вод на границе фильтрации,

H_1 – напор первого водоносного комплекса на границе фильтрации,

H_2 – напор второго водоносного комплекса на границе фильтрации.

Другими словами, напоры и расходы по разную сторону границы комплексов пород равны между собой.

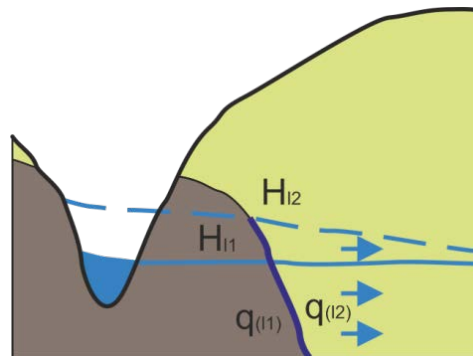


Рисунок 3.4 – Схема граничного условия четвертого рода: Фиолетовым цветом выделена граница двух водоносных комплексов в зоне сатурации. Голубым пунктиром показан первоначальный уровень грунтовых вод. Голубой сплошной изменившийся уровень H_{11} – уровень подземных вод первого водоносного комплекса на границе фильтрации, H_{12} – уровень подземных вод второго водоносного комплекса на границе фильтрации. q_{11} – расход подземных вод первого водоносного комплекса на границе фильтрации. q_{12} – расход подземных вод второго водоносного комплекса.

Конечно-разностная аппроксимация

Одним из подходов к решению уравнения (3.1) является метод конечных разностей, в котором непрерывная система, описываемая уравнением, заменяется

конечным набором пространственных и временных дискретных интервалов. При этом реальное непрерывное распределение напоров заменяются значениями в узловых точках сети, а частные производные от напора в любом месте заменяются приближенными разностями значений напора в ближайших узловых точках сети [74].

Таким образом, решение дифференциальных уравнений сводится к системе линейных алгебраических разностных уравнений, а их решение дает значения напора в известных точках для конкретных моментов времени. Существует несколько подходов к реализации конечно-разностной аппроксимации, ниже описана реализация, используемая в пакете MODFLOW 6 [116].

Поток грунтовых вод между соседними ячейками считается внутренним потоком. Математическое выражение, описывающее внутренний одномерный поток – дискретная форма закона Дарси. Поток между двумя ячейками может быть точно описан как произведение гидравлической проводимости на разницу напоров между двумя ячейками. Это выражение именуется уравнением потока на основе проводимости (conductance-based flow equation).

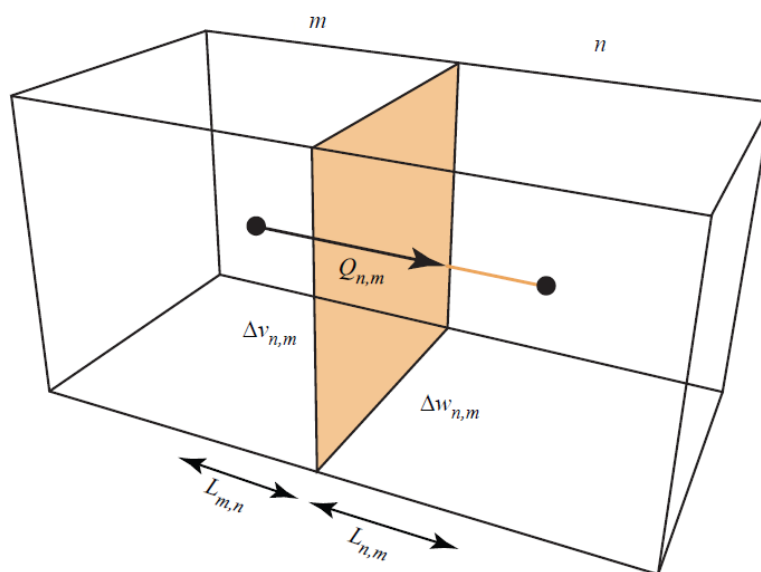


Рисунок 3.5 – Схема расчета внутреннего потока между ячейками

Поток считается положительным, если он направлен в рассматриваемую ячейку n . Рисунок 3.5 содержит схему, изображающую поток в ячейку n из ячейки m [116]. Поток, при этом описывается как:

$$Q_{n,m} = K_{n,m} \Delta w_{n,m} \Delta v_{n,m} \frac{h_m - h_n}{L_{n,m} + L_{m,n}}, \quad (3.10)$$

где $Q_{n,m}$ – расход (скорость потока) в ячейку n из ячейки m ,

$K_{n,m}$ – эффективный коэффициент фильтрации между центрами ячеек,

$\Delta w_{n,m}$ – ширина общей грани между ячейками,

$\Delta v_{n,m}$ – высота зоны насыщенности между ячейками,

h_n, h_m – напор в ячейке n и m соответственно.

$L_{n,m}, L_{m,n}$ – соответственно, расстояние между центрами ячеек m и n и центром общей грани.

Формула описывает поток в одномерном стационарном случае через участок водоносного комплекса между центрами ячеек m и n через ортогонально пересекающую плоскость площадью $\Delta w_{n,m} \Delta v_{n,m}$. При этом $K_{n,m}$ зависит от свойств материала, является эффективным коэффициентом фильтрации на участке между центрами ячеек, обычно определяется как среднее гармоническое коэффициента фильтрации пород. Такие же выражения могут быть получены при описании потока из всех соседних ячеек в плане и по высоте.

Выражение (3.10) описывает поток через грань ячейки n с помощью напора, размеров граней и коэффициента фильтрации. Это выражение может быть упрощено, используя понятие “гидравлическая проводимость” или “проводимость”, получаемое перемножением размеров ячейки и коэффициента фильтрации:

$$C_{n,m} = \frac{K_{n,m} \Delta w_{n,m} \Delta v_{n,m}}{L_{n,m} + L_{m,n}}, \quad (3.11)$$

где $C_{n,m}$ – проводимость между ячейками n и m .

Так, проводимость определяется как произведение коэффициента фильтрации и площади поперечного сечения потока, разделенные на расстояние между центрами ячеек.

Подставляя проводимость в выражение (3.11), получаем уравнение потока на основе проводимости (conductance-based flow equation).

$$Q_{n,m} = C_{n,m}(h_m - h_n), \quad (3.12)$$

В данном виде уравнение легко обрабатывается с помощью расчетных алгоритмов.

3.2 Моделирование системы “естественная геологическая среда – дезинтегрированный массив” на Соколовском месторождении

3.2.1 Задачи моделирования

Условия участка исследований – взаимное влияние нескольких объектов на фильтрационный режим, неоднородные фильтрационные свойства и сложная морфология основного водоносного комплекса вызывают необходимость применения гидродинамического моделирования для определения фильтрационных параметров массива зоны обрушения и решения прогнозных задач. В рамках работы, посредством моделирования, планируется решить ряд задач:

1. Решение обратной задачи стационарного режима фильтрации, соответствующему текущему состоянию подземных работ (2007 г. – 2018 г.) с целью калибрации граничных условий и параметров модели. Критерием сходимости численной модели служит соответствие модельных уровней подземных вод наблюдаемым в эоцен-меловом и палеозойском комплексах и балансовых составляющих рассматриваемой территории - расходы водоотлива из водопонижительных систем Сарбайского, Соколовского карьеров и Соколовского подземного рудника. Результат решения задачи – уточнение гидрогеологических условий объекта исследований, подтверждение корректности отражения на модели наблюдаемых процессов, доказательство возможности использования модели для прогноза изменения ситуации с необходимой достоверностью.

2. Решение параметрических задач для установления закономерностей между фильтрационными свойствами дезинтегрированного массива, глубиной техногенной нарушенной области и водопритоками к выпускающему комплексу для условий Соколовско-Сарбайской группы месторождений

3. Решение прогнозных задач для сценария осушения Соколовского месторождения с учетом морфологических особенностей эоцен-мелового водоносного комплекса в пространстве между внешним дренажным контуром и дезинтегрированным массивом зоны обрушения.

Первые две задачи решаются в рамках настоящей главы квалификационной работы, третья в рамках четвертой, последней главы.

С учетом установленных закономерностей: связи притоков к зоне обрушения и внешнему дренажному контуру, геофильтрационная модель системы “естественная среда-дезинтегрированный массив зоны обрушения” включает в себя два водоносных комплекса – эоцен-меловой и палеозойский и один разделяющий слой древней коры выветривания.

3.2.2. Описание фильтрационной модели

Для моделирования фильтрационных процессов в системе “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения” предлагается рассматривать зону обрушения как отдельный гидрогеологический элемент со своими фильтрационными и емкостными параметрами, подошва которого представляет собой дренаж (Рисунок 3.6). Дрена – известный вариант граничного условия третьего рода, описывается двумя параметрами: фильтрационным сопротивлением и отметкой. При превышении напора подземных вод отметки дрены появляется расход из системы, величина которого функционально связана с фильтрационным сопротивлением дрены.

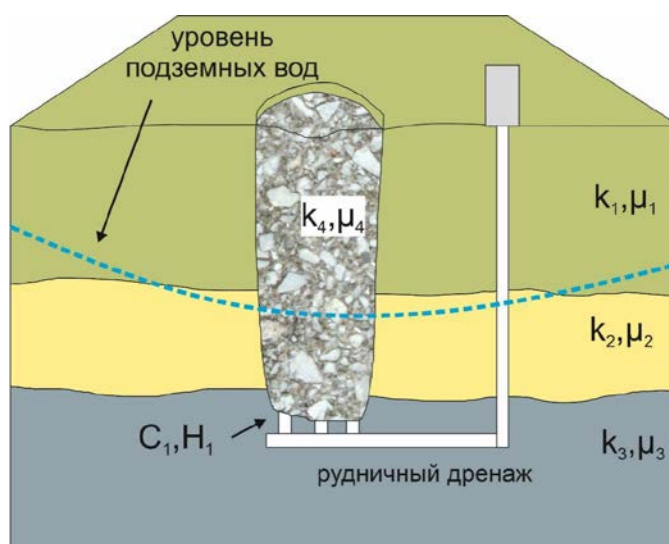


Рисунок 3.6 – Концептуальная фильтрационная модель зоны дезинтегрированного массива зоны обрушения. k_n, μ_n – коэффициенты фильтрации и ёмкости гидрогеологических элементов (1, 2, 3 – слои, 4 – зона обрушения), C_1, H_1 – фильтрационное сопротивление и отметка дрены

При создании геофильтрационной модели предлагается в качестве границ дрены использовать площадь очистных работ или зоны обрушения. Автором показано, что площади воронок обрушения и очистных работ отличаются незначительно и при моделировании фильтрационных процессов разницей можно пренебречь [117]. В качестве отметки дрены предлагается использовать комплекс очистных работ, а проводимость дрены определять путем решения обратных задач с использованием наблюдений за шахтным водоотливом.

Область моделирования

Пространственные границы модели включают участок с приблизительными размерами 34 тыс. м в длину и 24 тыс. м в ширину, который включает объекты Соколовско-Сарбайского комплекса (Сарбайский карьер, Соколовский карьер и ш. "Соколовская"). Схему пространственных границ модели содержит Рисунок 3.7. С юга участок ограничен естественным пределом формирования водосбора – р. Тобол.

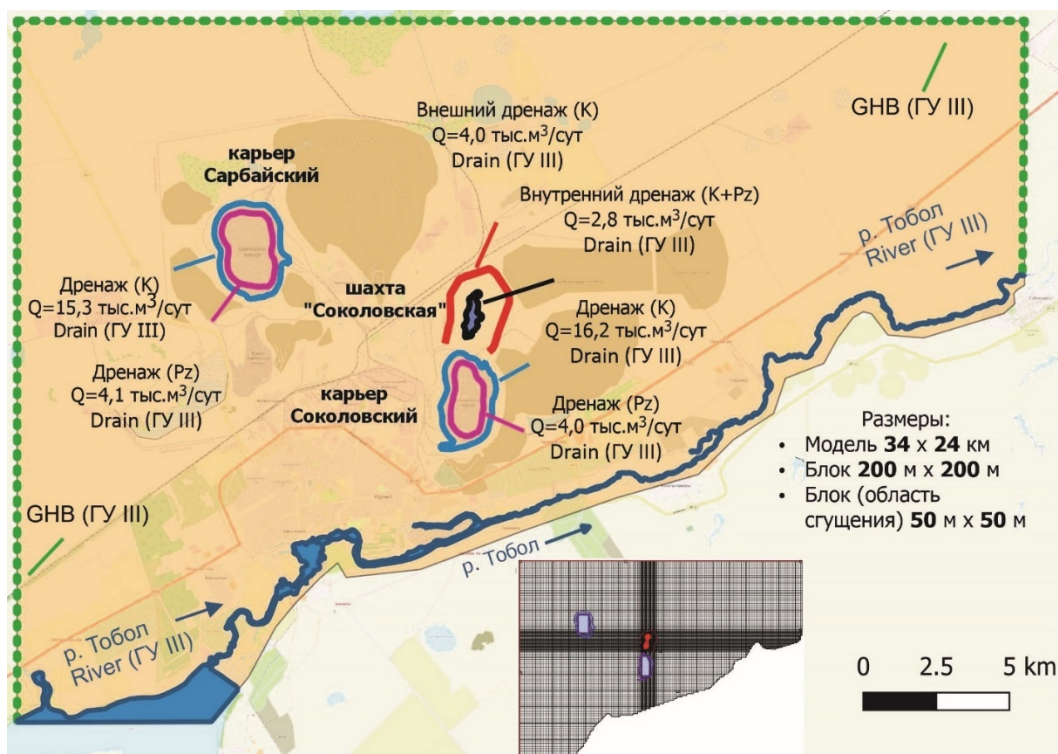


Рисунок 3.7 – Схема геофильтрационной модели района Соколовско-Сарбайского железорудного комплекса. Сгущение сети ограничено периметром внутреннего дренажа (красный цвет). Q - расход дренажа, тыс. м³/сут, K – эоцен-меловой водоносный комплекс, Pz – палеозойский водоносный комплекс. Зона обрушения на рисунке совпадает с внутренним дренажем.

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, в пределах внешнего дренажного контура (Рисунок 3.7, дренажный контур выделен красным цветом) реализовано сгущение расчетной сети с целью более тонкого учета рельефа элементов залегания мелового эоцен-водоносного комплекса. Размер элемента сети сгущения – 50 м. Модель состоит из 4 х слоев, дискретизация модели 204 блока вдоль оси X, 161 блок вдоль оси Y. Общее количество расчетных элементов составляет 164 220 единиц.

Стратификация модели

Наличие слоя чеганских глин мощностью до 35 м, являющегося региональным водоупором, обуславливает разделение режимов эоцен-мелового комплекса и олигоценового комплексов. В естественном режиме фильтрации уровни подземных вод различались между собой не более чем на 20 м. В результате работы рудничного дренажа, уровень подземных вод эоцен-мелового водоносного комплекса снизился с 165 м до 95 м, в то же время уровень подземных вод олигоценового комплекса почти не изменился и по-прежнему составляет 175 м.

Вместе с тем данные наблюдений на карьерах Сарбайский и Соколовский показывают, что приток к их дренажным системам из олигоценового комплекса не превышает 15% от общего водопритока. Эоцен-меловой комплекс обеспечивает 70% от общего водопритока, и еще 1% от общего притока поступает из палеозойского водоносного комплекса, гидравлически связанного с меловым.

Отсутствие связи между олигоценовым и нижележащими комплексами, а также относительно небольшой вклад доля олигоценового комплекса в общий водоприток позволяет исключить его из расчетов.

Модель включает два водоносных комплекса – эоцен-меловой и палеозойский, разделенные водоупорным слоем коры выветривания (Рисунок 3.8). Эоцен-меловой водоносный комплекс представлен в модели меловым водоносным комплексом, т. к. в текущем режиме фильтрации в пределах модели верхняя часть

комплекса – опоковая толща является осушенной. Для упрощения расчетов водопритоки олигоценового водоносного комплекса имитировались в составе притоков эоцен мелового водоносного комплекса.

Особенностями развития гидравлической проводимости палеозойских пород определяют развитие подземных вод только в верхней выветрелой части комплекса (Рисунок 2.4, области 9 и 10), при этом нижняя часть (Рисунок 2.4, область 11) является водоупором. Фильтрационные свойства убывают с глубиной – на модели комплекс представлен двумя слоями с различающимися фильтрационными характеристиками. Первый соответствует зоне трещиноватых пород с высокими фильтрационными свойствами, второй, нижележащий, – менее нарушенной зоне, с более низкими фильтрационными свойствами. Нижняя часть, (Рисунок 2.4, область 11) за отсутствием необходимости не включена в модель. Исходными данными для морфологии слоев служили материалы геологического опробования.

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		Олигоценовые (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	
+80		Меловые (пески)	K ₂	30 - 45	0,7 - 6,0		Водоносный	
+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 3.8 – Стратификация и характеристики фильтрационной модели. *H* – абсолютные отметки, *m* – мощность, *k* – коэффициент фильтрации

Граничные условия

К внешним граничным условиям относятся основной поверхностный водоток – р. Тобол и подземный приток со стороны водораздела. Внутренними граничными условиями считаются дренажные системы объектов Соколовско-Сарбайского комплекса – карьеров Соколовский и Сарбайский и шахты “Соколовская”, Таблица 3.1.

Таблица 3.1 – Схематизация граничных условий

Тип ГУ	Моделируемый объект	Q (расход), м ³ /сут	C (проницаемость границы), м ² /сут
III род: Drain	Дренажная система	$\begin{cases} Q_d = C_d \cdot (h - d), h > d \\ Q_d = 0, d > h \end{cases}$ <p><i>h</i> – уровень подземных вод, м <i>d</i> – отметка подошвы дрены, м</p>	$C_d = K \cdot L$ <p><i>K</i> – коэффициент фильтрации дрены, м/сут <i>L</i> – длина дрены, м</p>
III род: River	Река Тобол	$\begin{cases} Q_{riv} = C_{riv} \cdot (h_{riv} - B_{riv}), h_{riv} > B_{riv} \\ Q_{riv} = C_{riv} \cdot (B_{riv} - h), h < B_{riv} \end{cases}$ <p><i>h</i> – уровень подземных вод, м <i>h_{riv}</i> – уровень воды в реке, м <i>B_{riv}</i> – отметка подошвы русловых отложений, м</p>	$C_{riv} = \frac{K_{riv} \cdot L \cdot W_{riv}}{M_{riv}}$ <p><i>K_{riv}</i> – коэффициент фильтрации русловых отложений, м/сут <i>L</i> – длина участка реки в блоке <i>W_{riv}</i> – ширина русла реки <i>M_{riv}</i> – мощность русловых отложений</p>
III род: ГНВ - General head boundary	Приток с водораздела	$Q_b = C_b \cdot (h_b - h)$ <p><i>h_b</i> – уровень подземных вод на удаленной границе I рода, м <i>h</i> – расчетный уровень подземных вод</p>	$C_b = K \cdot \frac{A}{L}$ <p><i>K</i> – коэффициент фильтрации материала на удаленной границе, м/сут <i>A</i> – площадь элемента, перпендикулярная потоку со стороны границы <i>L</i> – расстояние до объекта</p>

1. Поверхностные водотоки (р. Тобол, расположенная на юге моделируемой области) моделировались с помощью граничного условия третьего рода “Река”(River). При расчетах в качестве начального значения фильтрационного сопротивления ложа русловых отложений было принято значение 5 м²/сут. Специальных исследований фильтрационных характеристик ложа русловых

отложений не проводилось, поэтому параметр уточнялся в процессе калибровки модели.

2. Внешние границы модели в плане определяются границами водосборного бассейна, которые могут быть представлены на модели границами III рода через соответствующее фильтрационное сопротивление на расстоянии, которое не противоречит рассматриваемому процессу осушения водоносных комплексов и позволяет учитывать расширение области фильтрации в процессе осушения водоносных комплексов, что практически исключает погрешность, вносимую искусственным ограничением напоров по контуру внешней границы изучаемой площади.

Исходными данными о напорах в эоцен-меловом водоносном комплексе служили материалы подсчетов запасов дренажных подземных вод, которые уточнялись в процессе моделирования. Коэффициент проницаемости определялся путем калибровки модели.

3. Приток подземных вод к горным выработкам моделировался с помощью граничного условия третьего рода – дрен, позволяющих имитировать приток, при превышении уровня подземных вод отметок дрены и широко применяемого для моделирования дренажных мероприятий. Положение дрен содержит Рисунок 3.7. Глубина заложения соответствует отметкам прибортовых дренажей водоносных комплексов для карьеров, глубиной горных работ очистных комплексов для зоны обрушения подошвой эоцен-мелового водоносного комплекса для внешнего дренажного комплекса ш. «Соколовская». Для дрен карьеров использовалась линейная схематизация, при этом само внутреннее пространство карьеров считалось неактивным. Дренаж зоны обрушения, в соответствии с концептуальной моделью зоны обрушения, описывался площадными параметрами. Коэффициент проницаемости дрен определялся путем калибровки, критерием сходимости выступали результаты мониторинга водопритокков к дренажной системе ССГПО (Рисунок 3.7).

Фильтрационные параметры пород

При оценке запасов дренажных подземных вод было показано, что в пределах исследуемой области наблюдается значительный разброс фильтрационных свойств меловых песков [105]. Максимальные значения коэффициента фильтрации (до 20 м/сут) распределены вдоль действующих водотоков и постепенно снижаются к водоразделу до 0.5 м/сут. По материалам опытно-фильтрационных работ в области влияния Соколовского и Сарбайского месторождений величина коэффициента фильтрации меловых песков составляет 1–5 м/сут.

Коэффициент фильтрации достигает максимальных значений в долине Тобола и уменьшается в условно приводораздельной части по мере удаления от Тобола на север, запад и восток (Рисунок 3.8). Коэффициент фильтрации кор выветривания принят равным 0,0005 м/сут. Фильтрационные свойства пород палеозойского комплекса значительно различаются в зависимости от глубины залегания. В фильтрационной модели палеозойский комплекс представлен двумя модельными слоями. Коэффициент фильтрации верхней нарушенной части мощностью 50 м составляет 0,085 м/сут. Нижележащие породы с глубиной залегания от кровли от 50 до 100 м характеризуются коэффициентом фильтрации 0,005 м/сут.

3.2.3. Решение обратных задач

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

В процессе моделирования определялись или уточнялись параметры граничных условий и фильтрационные свойства области дезинтегрированного массива зоны обрушения ш. «Соколовской». Создание геофильтрационной модели осуществлялось в два этапа:

1. На первом этапе определялись параметры граничных условий по периметру модели – проницаемости русловых отложений р. Тобол и

проницаемости граничного условия третьего рода, имитирующего приток подземных вод (на Рисунок 3.7 выделено зеленым цветом).

2. На втором этапе имитировались дренажные системы объектов ССГПО – притоки к Сарбайскому и Соколовскому карьеру из эоцен-мелового и палеозойского водоносных комплексов, притоки к внешнему дренажному контуру и зоне обрушения ш. “Соколовская”.

Критериями сходимости модели выступали: баланс притока и расхода, среднегодовые притоки к дренажным устройствам объектов ССГПО и данные мониторинга уровня подземных вод вблизи рудного поля ш. “Соколовская”.

Таблица 3.2 – Притоки к дренажному комплексу ССГПО

Приток	к. Соколовский, эоцен-меловой комплекс	к.Сарбайский, эоцен-меловой комплекс	к. Соколовский, палеозойский. комплекс	к. Сарбайский, палеозойский. комплекс	ш. Соколовская, внешний дренажный контур	ш. Соколовская, внутренний дренажный контур и зона обрушения
Модельный приток, м ³ /сут	16252	16361	4068	4110	3977	2864
Набл. приток, м ³ /сут	16956	16872	4296	4200	3943	2955
отклонение, %	-4.3	-3.8	-5.3	-2.2	-0.8	3.1

Отклонение модельного распределения уровня подземных вод вблизи зоны обрушения от наблюдаемых значений составляет около 1 метра.

3.2.4. Закономерности изменения фильтрационных параметров

Для оценки влияния фильтрационных параметров зоны обрушения на приток к внутреннему контуру решена серия прямых задач гидрогеодинамического моделирования. Исследовалось влияние коэффициента фильтрации дезинтегрированного массива в зоне обрушения на изменение водопотока к зоне

обрушения. Фильтрационные параметры водоносных комплексов и граничные условия изложены в разделах 3.2.2 и 3.2.3 (Рисунок 3.7, Рисунок 3.8). 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” [118]. Полученные результаты описываются экспоненциальной функцией с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.85$, Рисунок 3.9.

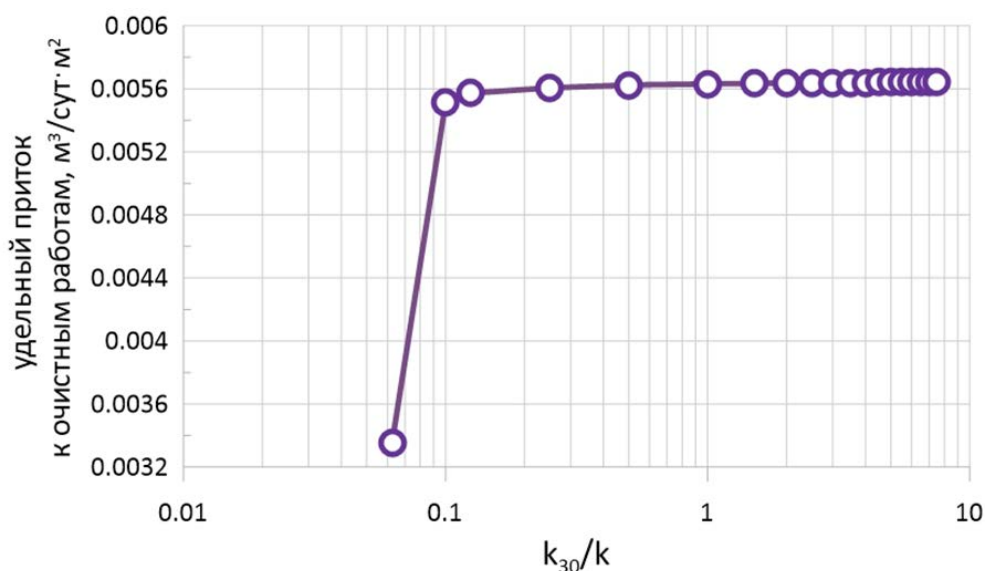


Рисунок 3.9 – Зависимость притоков к очистным работам от коэффициента фильтрации массива зоны обрушения. k_{30} – коэффициент фильтрации зоны обрушения, k – коэффициент фильтрации естественно залегающих отложений эоцен-мелового комплекса

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 мелового комплекса.

3.3 Выводы

Разработана геофильтрационная модель системы “естественно залегающие породы – дезинтегрированный массив зоны обрушения”. Модель базируется на

основе линейного закона фильтрации в численной реализации методом конечных разностей. Граничные условия и параметры модели получены в результате анализа данных геологического опробования, натуральных испытаний и серий решений обратных задач.

На численной фильтрационной модели Соколовского железорудного месторождения решена серия обратных задач, позволяющая определить и уточнить основные параметры и условия фильтрационных процессов в области влияния горных разработок.

С помощью решения задач для установившегося режима фильтрации определена зависимость между фильтрационными свойствами зоны обрушения и водопритоками к очистной зоне для условий артезианского бассейна с высокими фильтрационными свойствами основного водоносного комплекса, что позволяет сформулировать 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.

4. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДОПРИТОКОВ В СИСТЕМЕ “ЕСТЕСТВЕННО ЗАЛЕГАЮЩИЕ ПОРОДЫ – ДЕЗИНТЕГРИРОВАННЫЙ МАССИВ ЗОНЫ ОБРУШЕНИЯ”

4.1 Постановка задачи

Установление зависимостей между уровнем подземных вод в эоцен-меловом водоносном комплексе, водопритоками к дренажным устройствам и емкостными параметрами естественной геологической среды и дезинтегрированного массива зоны обрушения осуществлялось с помощью решения прогнозных задач. Для получения функциональной связи напоров в зоне обрушения и времени производились расчеты для нескольких значений упругой емкости мелового водоносного комплекса и зоны обрушения [119].

Прогнозные задачи решались с помощью геофильтрационной модели, описанной в предыдущей главе. Решение прогнозных задач подразумевало следующие исходные положения:

1. Цель - водопонижение в эоцен-меловом водоносном комплексе (моделируемом первым слоем) до отметки ниже среднего уровня подошвы комплекса в области зоны обрушения. Наблюдения по скважинам показывают, что уровень подземных вод в пределах рудного поля составляет 96–91 м. Требуемый уровень водопонижения зависит от морфологии подошвы эоцен-мелового комплекса, представленной в области рудного поля корой выветривания палеозойских пород.

В отличие от равнинного рельефа современной земной поверхности морфология подошвы эоце-мелового комплекса имеет сложный рельеф, с поднятиями и депрессиями – аналогами низин, холмов, долин. В непосредственной близости от рудного поля перепад высот составляет от 71 до 99 м, диапазон изменения отметок составляет почти 30 м (Рисунок 4.1). Из положения изогипс подошвы комплекса видно, что на большей части границы зоны обрушения уровень подземных вод фактически сравнивается с подошвой при значениях 82-84 м.

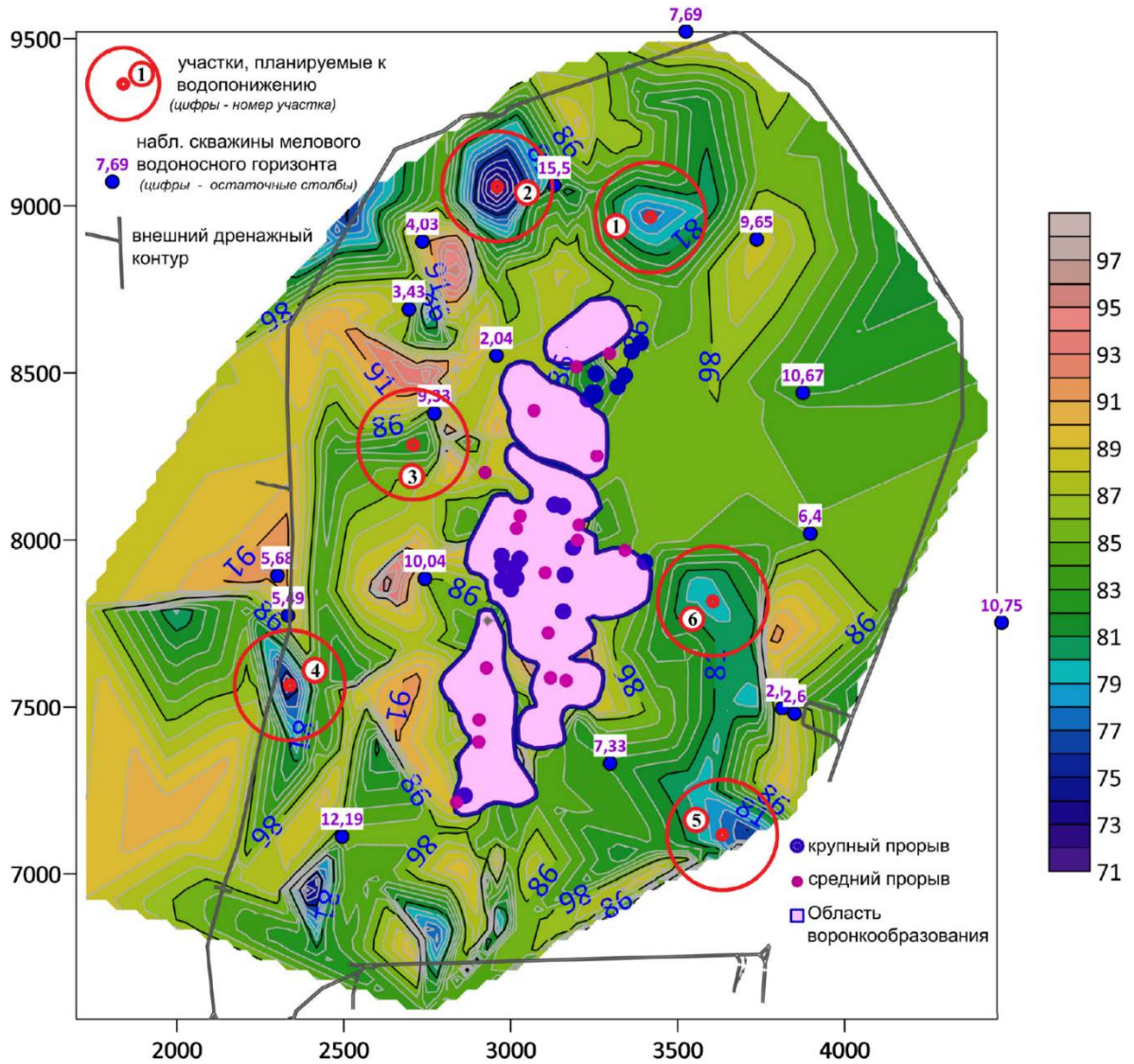


Рисунок 4.1 – Концепция модернизации дренажной системы шахты “Соколовская” с учетом особенностей морфологии подошвы мелового водоносного комплекса. (Цветовой шкалой показаны изогипсы подошвы эоцен-мелового комплекса)

2. Водопонижение осуществляется с помощью дополнения к существующему дренажному контуру шести скважин, расход каждой из которых составляет $50 \text{ м}^3/\text{час}$ ($1200 \text{ м}^3/\text{сут}$). Скважины расположены в зонах локальных депрессий рельефа подошвы 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. Общий расход шести скважин составил $7200 \text{ м}^3/\text{сут}$.

3. Темп снижения уровней оценивается для трех прогнозных сценариев (вариантов), которые отличаются значениями упругой емкости определяющих гидрогеологических элементов. Базовый сценарий №2 соответствует обоснованным оценкам емкости меловых отложений и зоне обрушения [10]. Пессимистичный сценарий №1 предусматривает повышенную емкость дезинтегрированного массива зоны обрушения. Позитивный сценарий №3 предполагает гравитационное сжатие (переотложение) меловых отложений под влиянием многолетнего водоотлива и переотложение дезинтегрированного массива зоны обрушения (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Емкостные параметры фильтрационной модели

№	Моделируемый элемент	k, м/сут	Упругая ёмкость		
			Прогноз №1	Прогноз №2	Прогноз №3
1	Эоцен-меловой водоносный комплекс	0,7-6*	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
2	Зона обрушения	10	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
3	Кора выветривания палеозойских пород (водоупор)	0,0005	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
4	Верхняя часть трещиноватой зоны палеозойского водоносного комплекса	0,085	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
5	Нижняя часть трещиноватой зоны палеозойского водоносного комплекса	0,005	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

* распределение коэффициента фильтрации в эоцен-меловом неравномерно – максимальные значения по течению р. Тобол, уменьшаются в направлении водораздела, см. раздел 3.2.2.

4. Определяется темп снижения напоров в двух характерных точках - вблизи ожидаемых минимальных и максимальных напоров в пределах зоны обрушения. Точка №1 расположена в центральной области зоны обрушения, точка №2 вблизи крайней северной точки границы зоны обрушения

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

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

4.2 Результаты моделирования

Распределение уровней подземных вод в эоцен-меловом комплексе содержит Рисунок 4.2, а в палеозойском комплексе – Рисунок 4.3. Наблюдается разница в закономерностях распределения уровней подземных вод в водоносных комплексах:

1) значительно увеличение градиента уровней подземных вод палеозойского комплекса в депрессионных воронках карьеров (Рисунок 4.5), по сравнению с эоцен-меловым вследствие значительно меньшего коэффициента фильтрации ($k_{(Pz)} = 0.085$ м/сут, $k_{(K)} = 0.7-6$ м/сут);

2) более выраженная депрессионная воронка ш. “Соколовская” (Рисунок 4.2) в эоцен-меловом комплексе по сравнению с палеозойским – вследствие совместного воздействия на режим подземных вод в эоценовом комплексе внешнего дренажа ш. “Соколовская” ($Q_{(K)}=4,1$ м³/сут) и водопритока к зоне обрушения ($Q_{(K+Pz)}= 2,9$ м³/сут) из которого значительная часть – из высокопроводимого эоцен-мелового комплекса за счет высоких значений коэффициента фильтрации эоцен-меловых отложений и зоны обрушения ($k_{(K)} = 0.7-6$ м/сут, $k_{(30)} = 5$ м/сут) по сравнению с палеозойскими породами ($k_{(Pz)} = 0.085$ м/сут);

3) наблюдаемая плоская поверхность уровня подземных вод палеозойского комплекса в зоне обрушения (Рисунок 4.5) объясняется также значительным превышением *фильтрационных свойств* массива зоны обрушения над фильтрационными свойствами *палеозойских пород*, что с одной стороны обеспечивает меньший приток из палеозойского комплекса, по сравнению с эоцен-меловым и отсутствие выраженной депрессивной воронки с одной стороны (за счет малого притока из палеозойских пород, по сравнению с эоцен-меловыми отложениями), а с другой “выполаживание” поверхности уровня подземных вод.

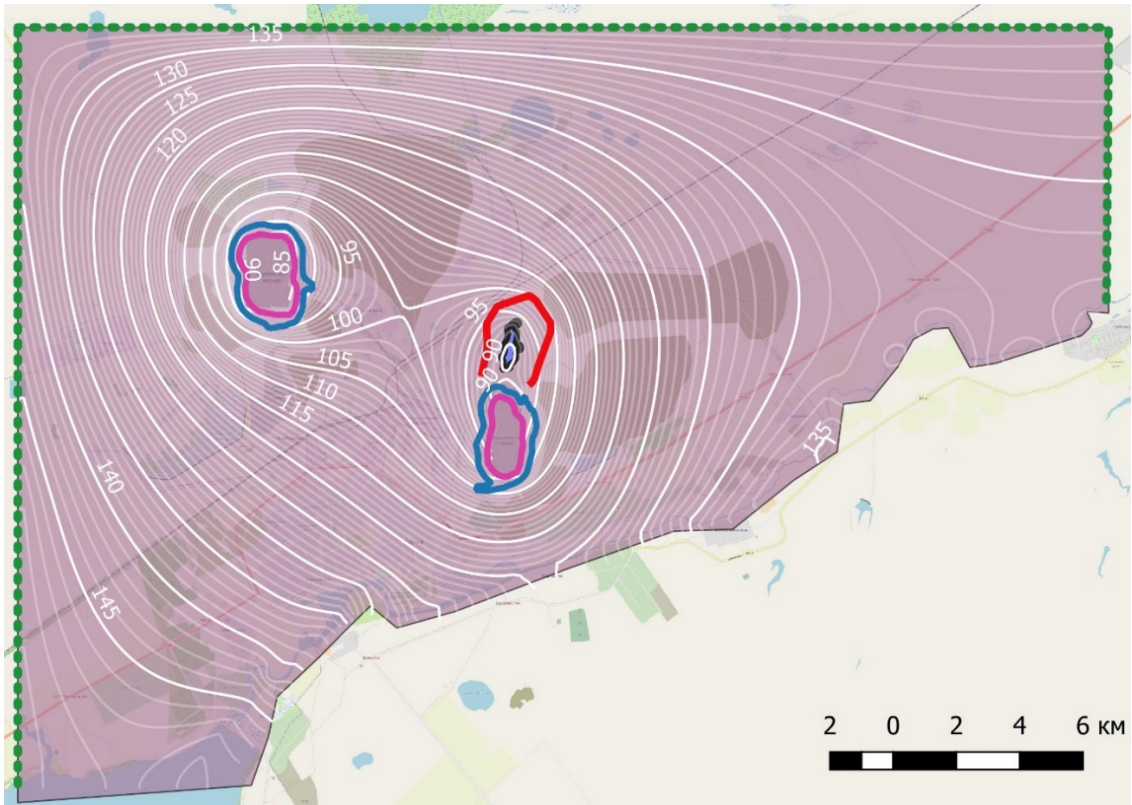


Рисунок 4.2 – Распределение уровней подземных вод в эоцен-меловом
ВОДОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ

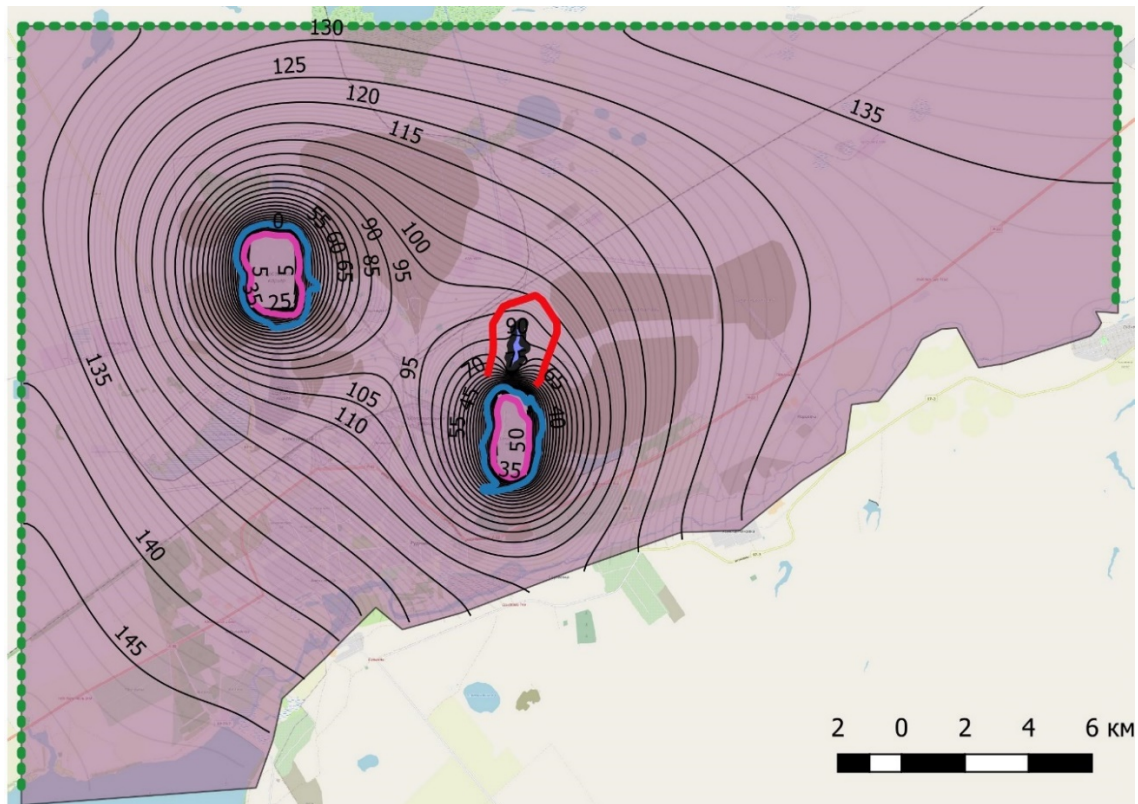


Рисунок 4.3 – Распределение уровней подземных вод в палеозойском
ВОДОНОСНОМ КОМПЛЕКСЕ

В результате решения прогнозных фильтрационных задач получены распределения напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, палеозойском водоносном комплексе на начало, середину и конец осушения (Рисунок 4.4 – Рисунок 4.17), графики понижения уровня подземных вод (Рисунок 4.16 – Рисунок 4.17), баланс фильтрационной модели (Рисунок 4.20 – Рисунок 4.22), а также баланс модели в области шахтного поля (внутри периметра внешнего дренажа, Рисунок 4.4, выделено красным цветом), включающей внешний и внутренний дренажные контуры ш. “Соколовская” (Рисунок 4.23 – Рисунок 4.25). Анализ результатов моделирования показывает различную природу изменения уровней подземных вод в эоцен-меловом и палеозойском водоносных комплексах.

В эоцен-меловом комплексе водопонижение происходит за счет прямого дренажа скважинами, расположенными в локальных понижениях подошвы. Формируются локальные депрессионные воронки, которые постепенно сливаются в одну вокруг очистных работ.

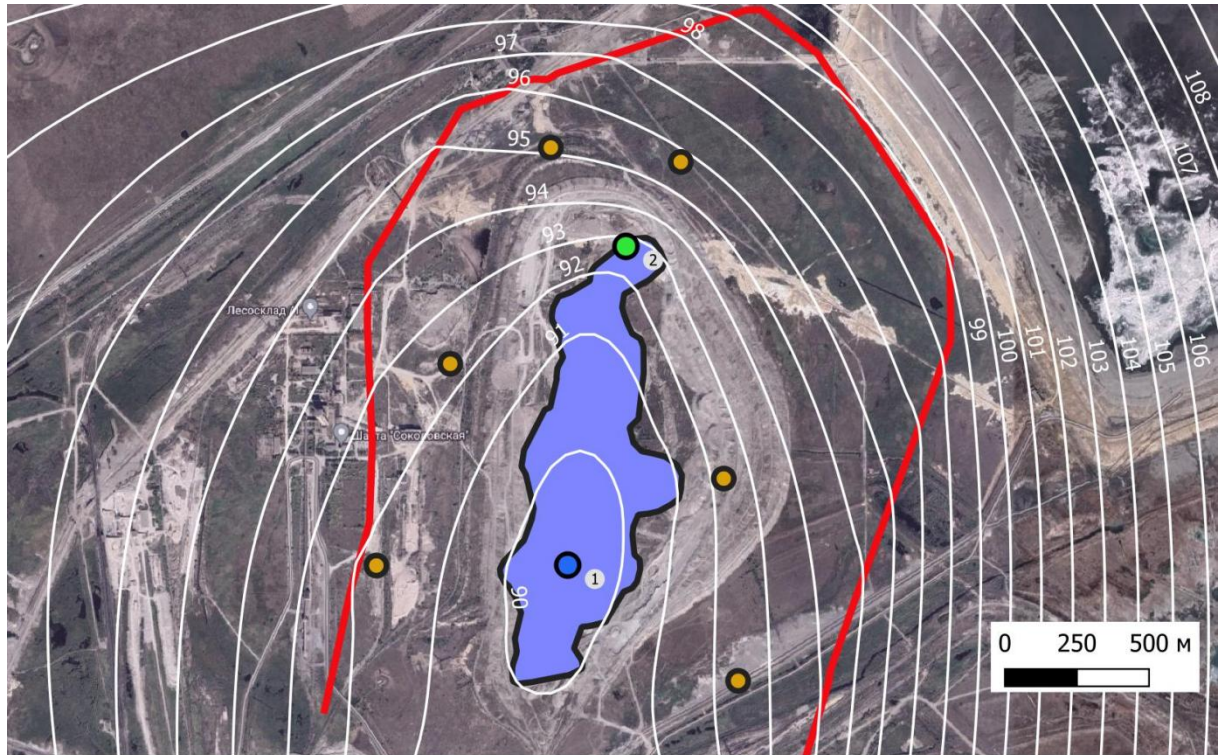
В палеозойском комплексе водопонижение происходит вследствие уменьшения перетекания из эоцен-мелового комплекса (уменьшение вызвано локальным дренажом эоцен-мелового комплекса). Соответственно, уровень подземных вод в палеозойском комплексе уменьшается, однако наклон зеркала подземных вод остается по-прежнему направленным в сторону Соколовского карьера.

Скорость изменения уровня подземных вод значительно зависит от емкостных показателей меловых песков и дезинтегрированного массива. Вместе с тем, для всех рассмотренных сценариев снижение уровня подземных вод с 91 м до 86 м занимает от 10 до 90 суток, т.е. не более трех месяцев.

Баланс модели во всех трех сценариях (Рисунок 4.20 – Рисунок 4.22) показывает постепенное снижение общего рудничного водоотлива, за счёт сработки ёмкости горных пород.

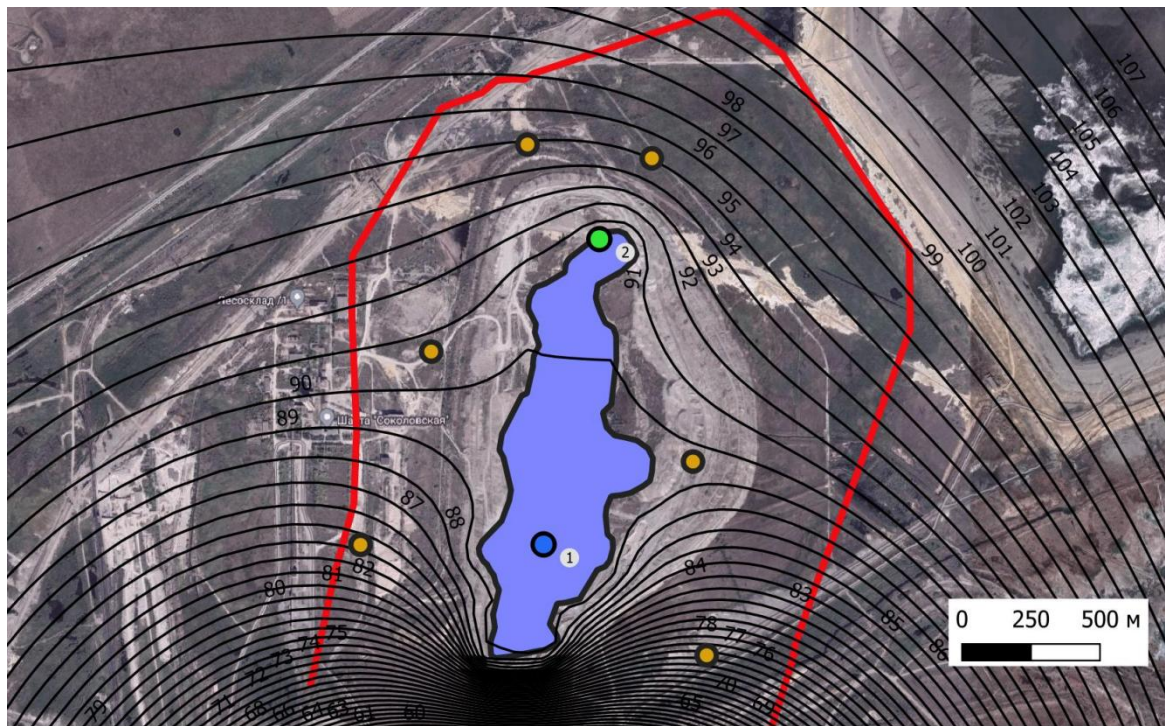
Те же процессы более контрастно заметны (Рисунок 4.23 – Рисунок 4.25) на балансе участка модели сгущения в районе рудного поля (участок внутри периметра внешнего дренажа, Рисунок 4.4, выделено красным цветом, схема

сгущения - Рисунок 3.7). Сработка ёмкости пород в области сгущения сопровождается уменьшением притока к внешнему дренажному контуру и шахтному водоотливу (состоящему главным образом из притока к зоне обрушения) и увеличением роли в балансе притока с внешней области модели, за пределами сети сгущения.



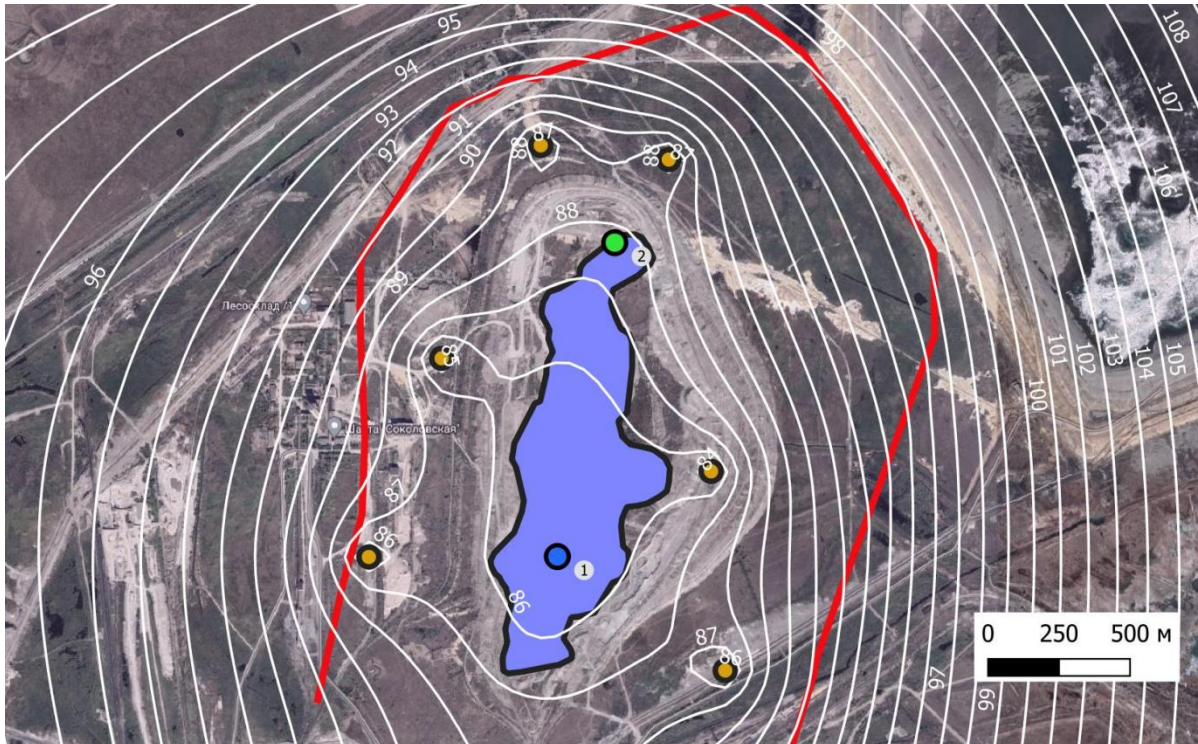
- контрольная точка 1
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- дренажные скважины
- контрольная точка 2
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.4 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе до начала откачки



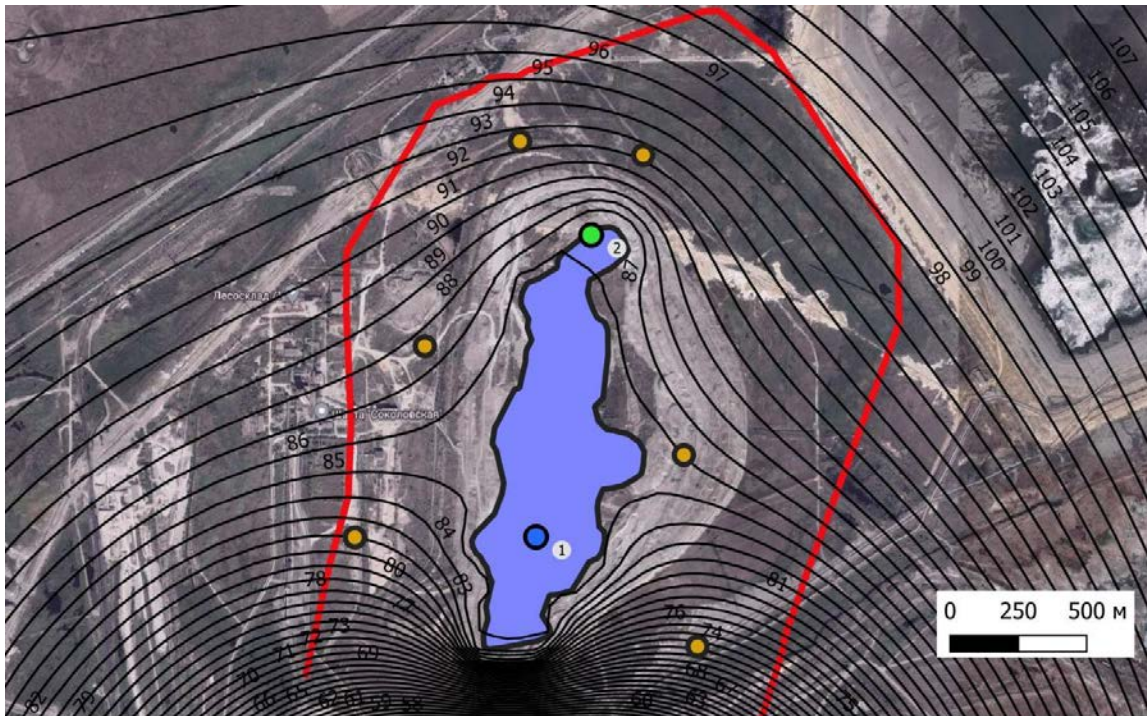
- контрольная точка 1
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- дренажные скважины
- контрольная точка 2
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.5 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе до начала откачки



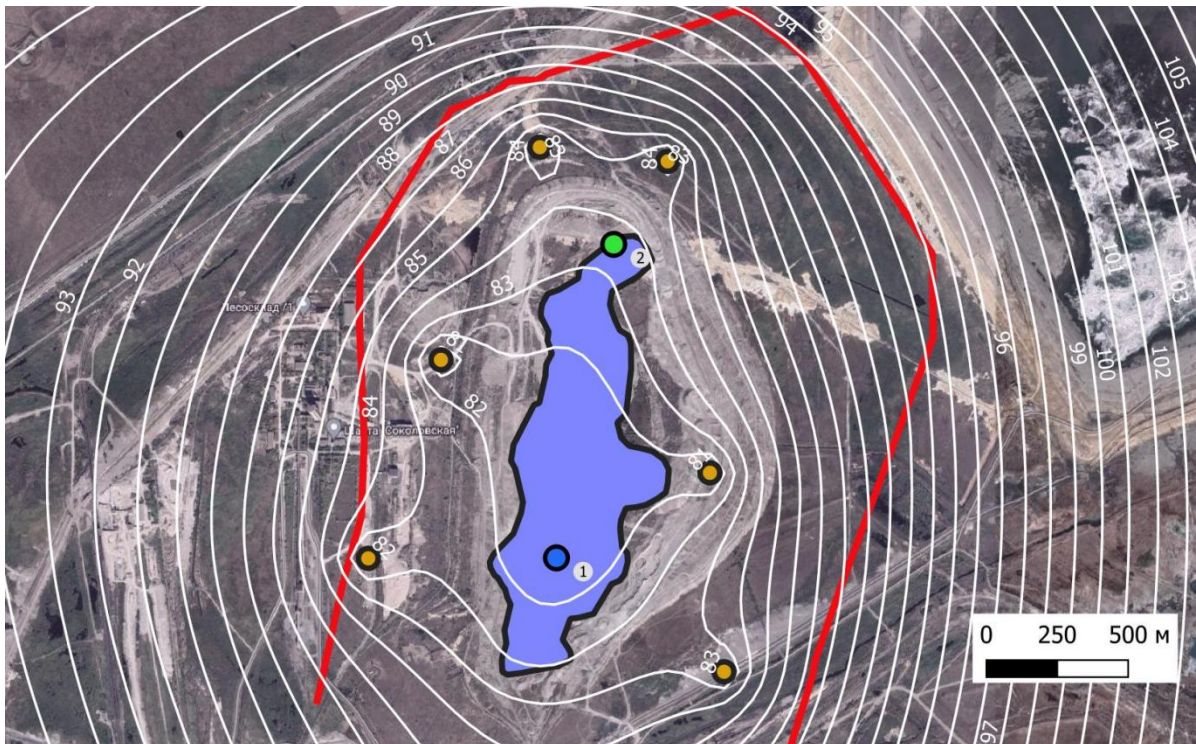
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.6 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 1, 72 сут после начала откачки



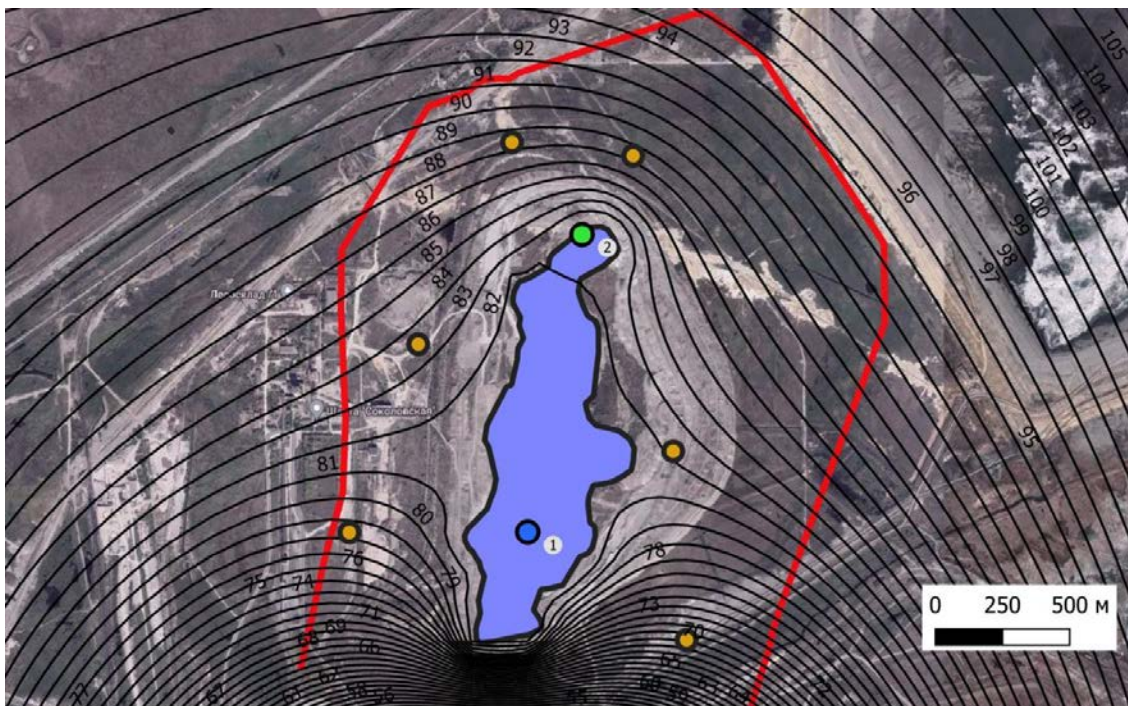
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.7 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 1, 72 сут после начала откачки



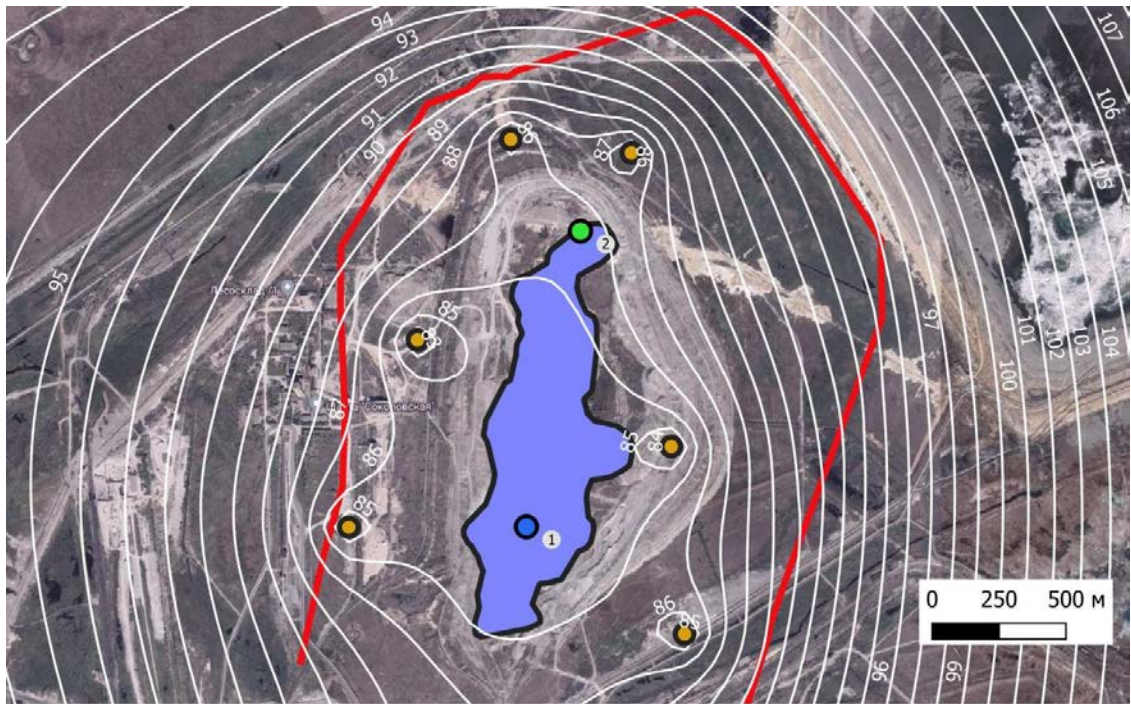
- контрольная точка 1
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- дренажные скважины
- контрольная точка 2
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.8 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 1, 720 сут после начала откачки



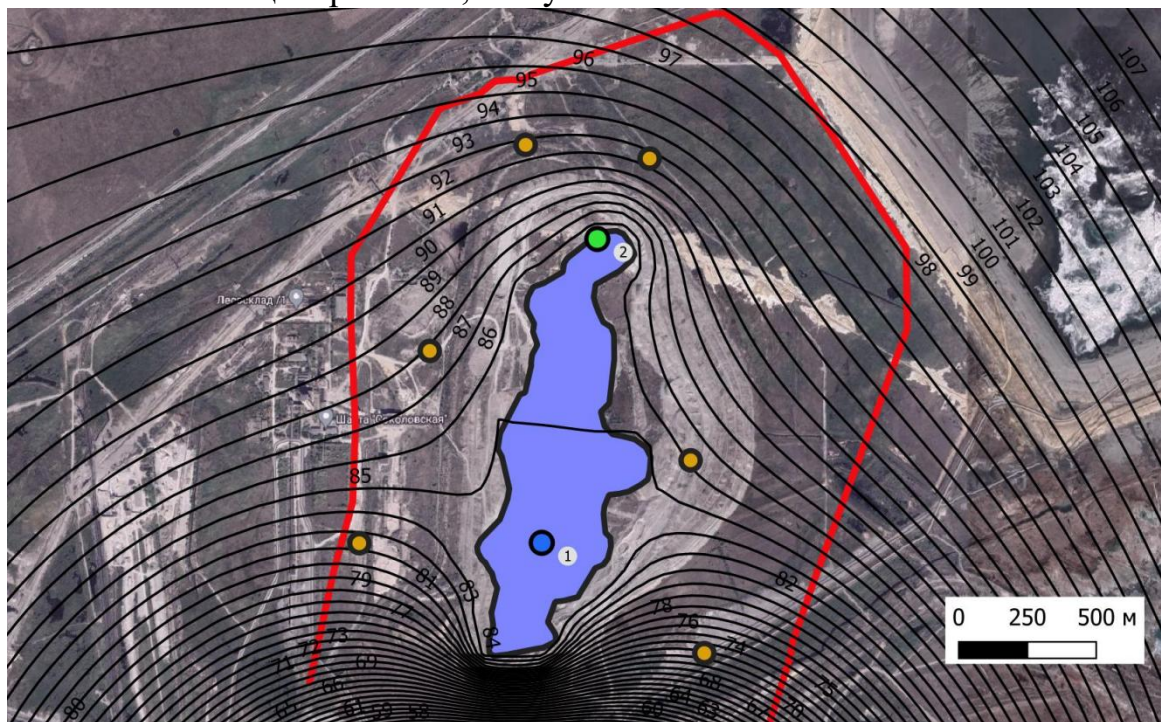
- контрольная точка 1
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- дренажные скважины
- контрольная точка 2
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.9 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 1, 720 сут после начала откачки



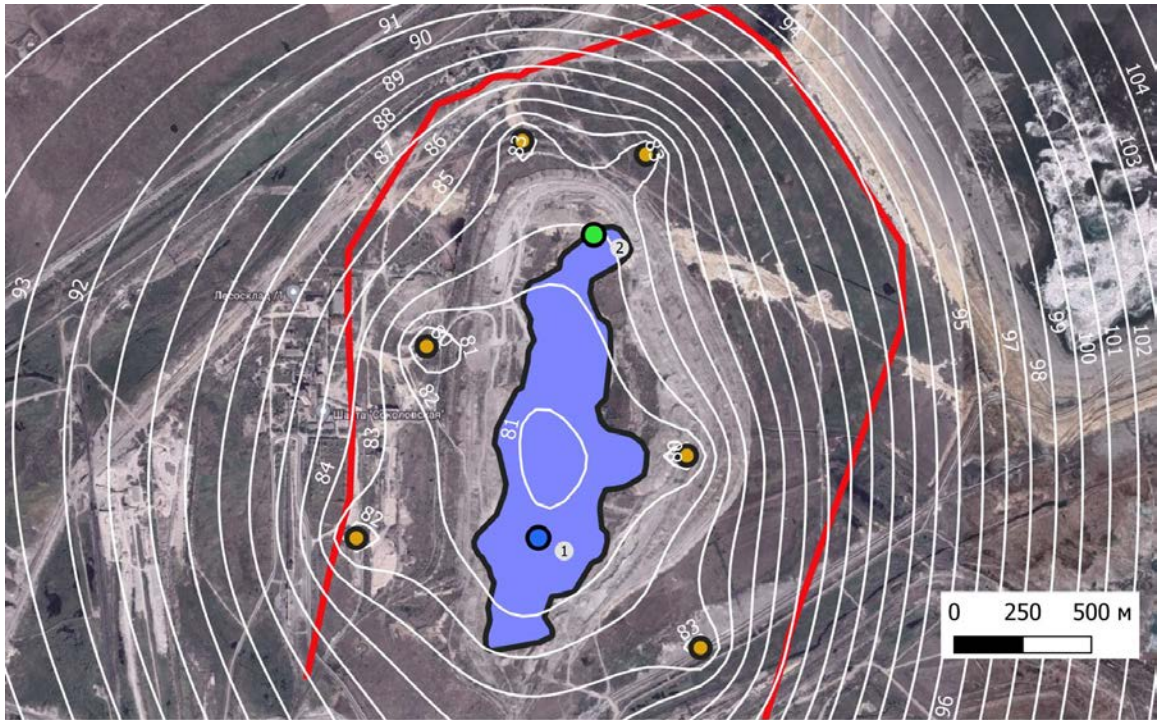
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.10 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 2, 31 сут после начала откачки



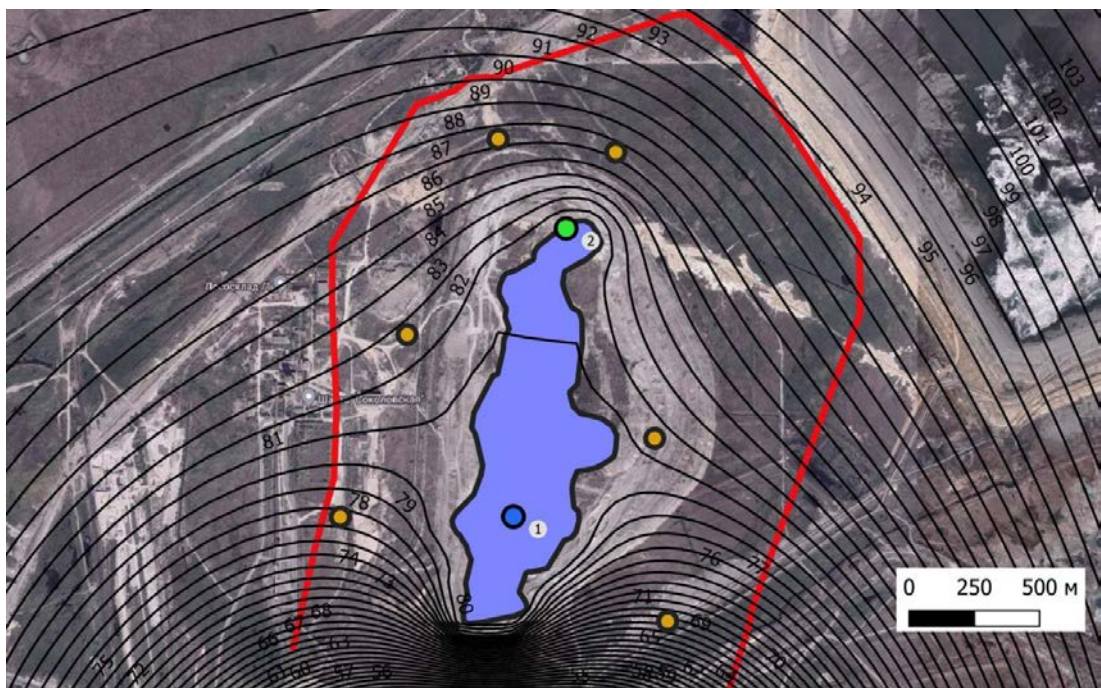
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.11 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 2, 31 сут после начала откачки



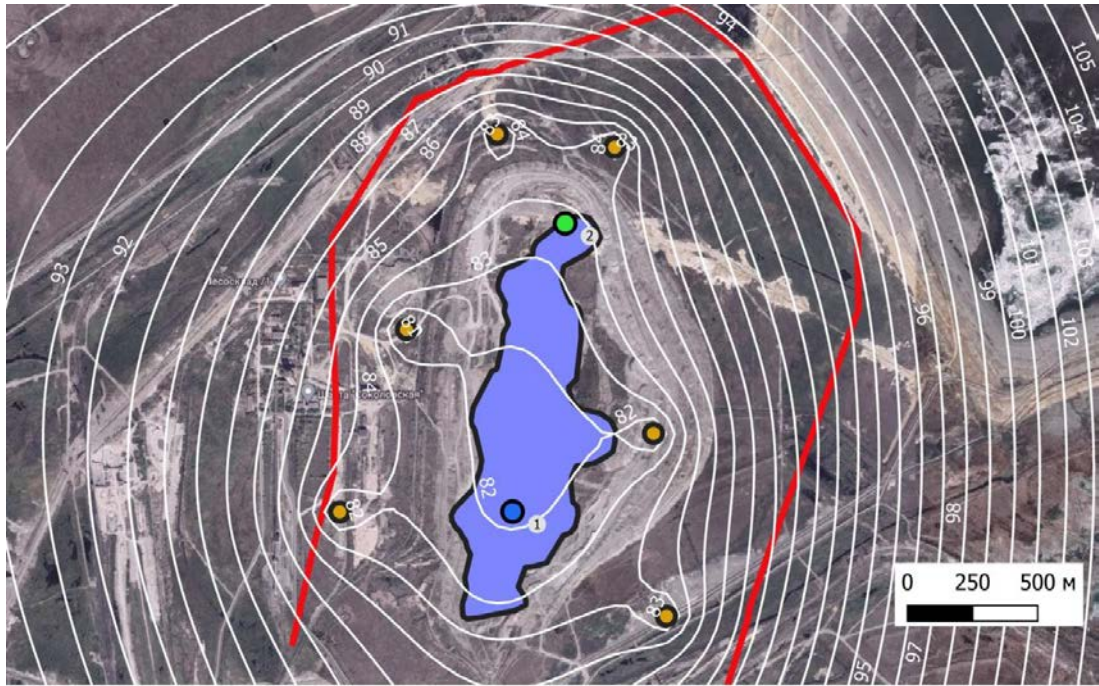
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.12 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 2, 720 сут после начала откачки



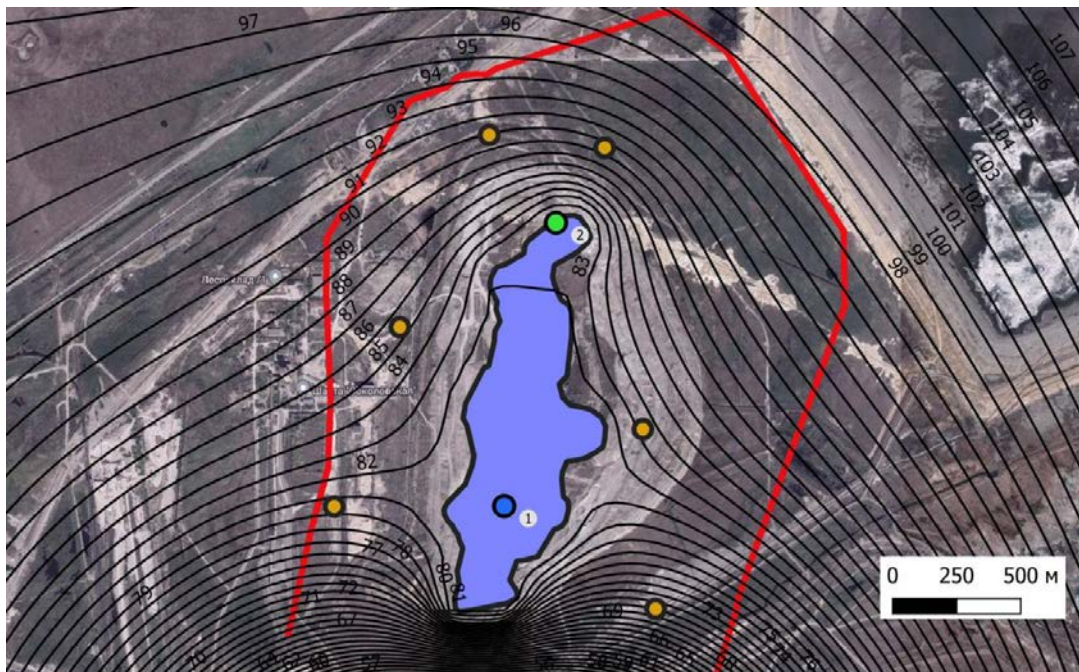
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.13 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 2, 720 сут после начала откачки



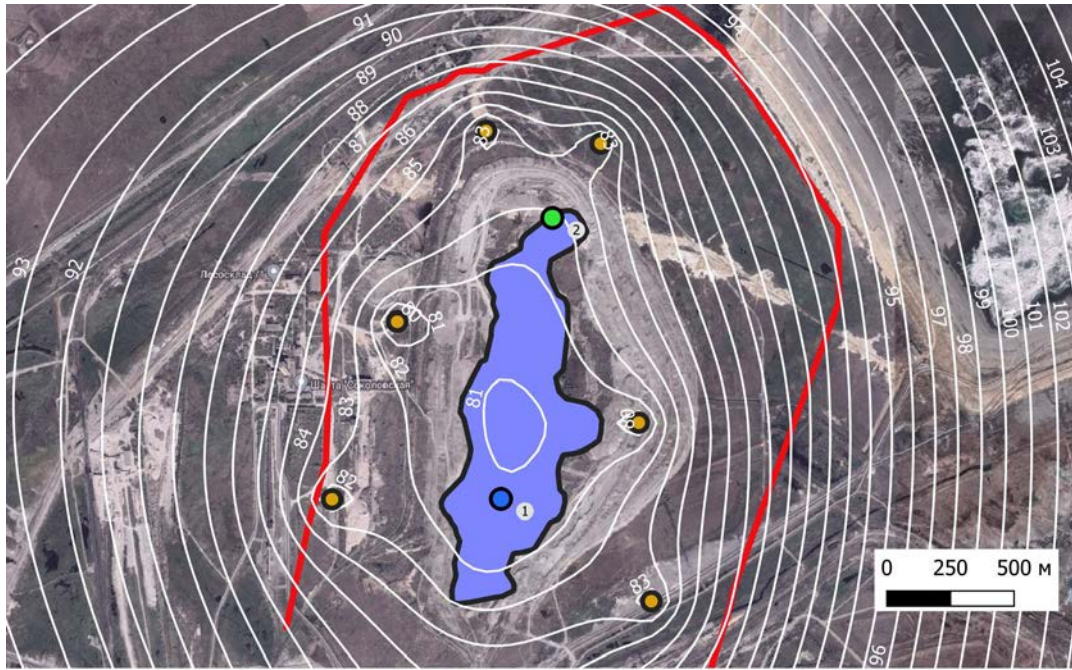
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.14 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 3, 31 сут после начала откачки



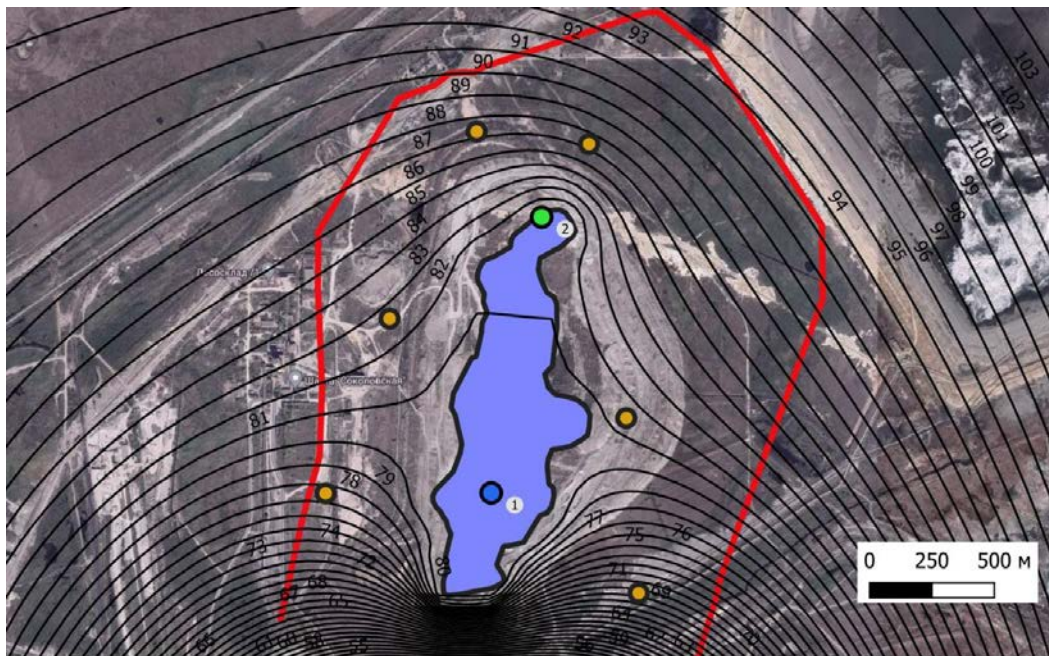
- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.15 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 3, 31 сут после начала откачки



- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.16 – Распределение напоров эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 3, 720 сут после начала откачки



- дренажные скважины
- контрольная точка 1
- контрольная точка 2
- зона обрушения ш. "Соколовская"
- внешний дренаж ш. "Соколовская"

Рисунок 4.17 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 3, 720 сут после начала откачки

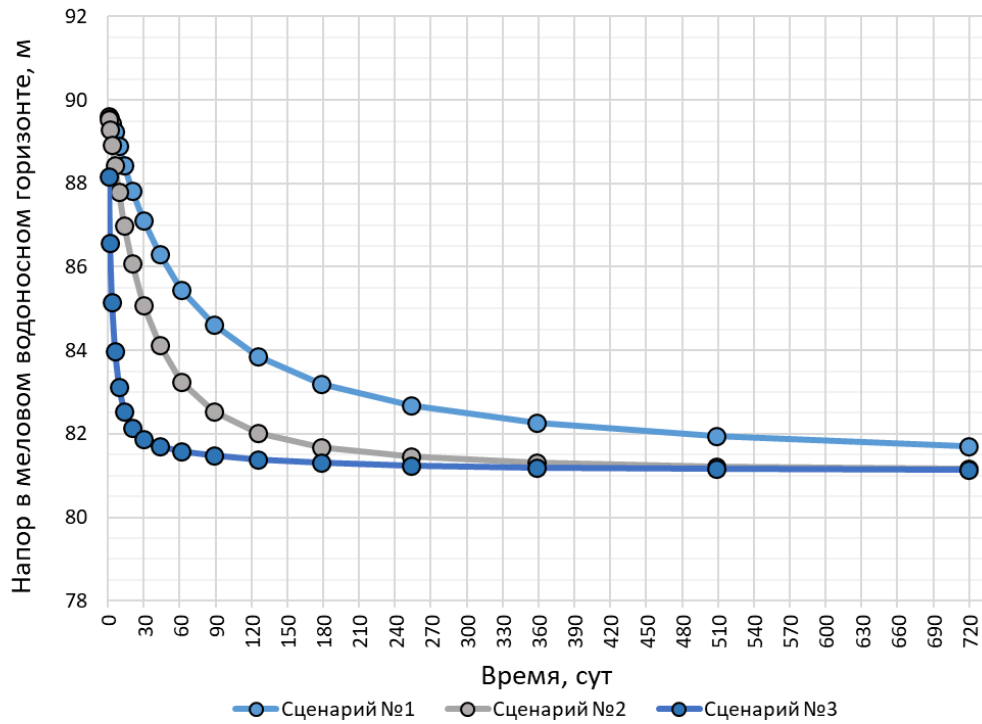


Рисунок 4.18 – График снижения напоров, контрольная точка № 1

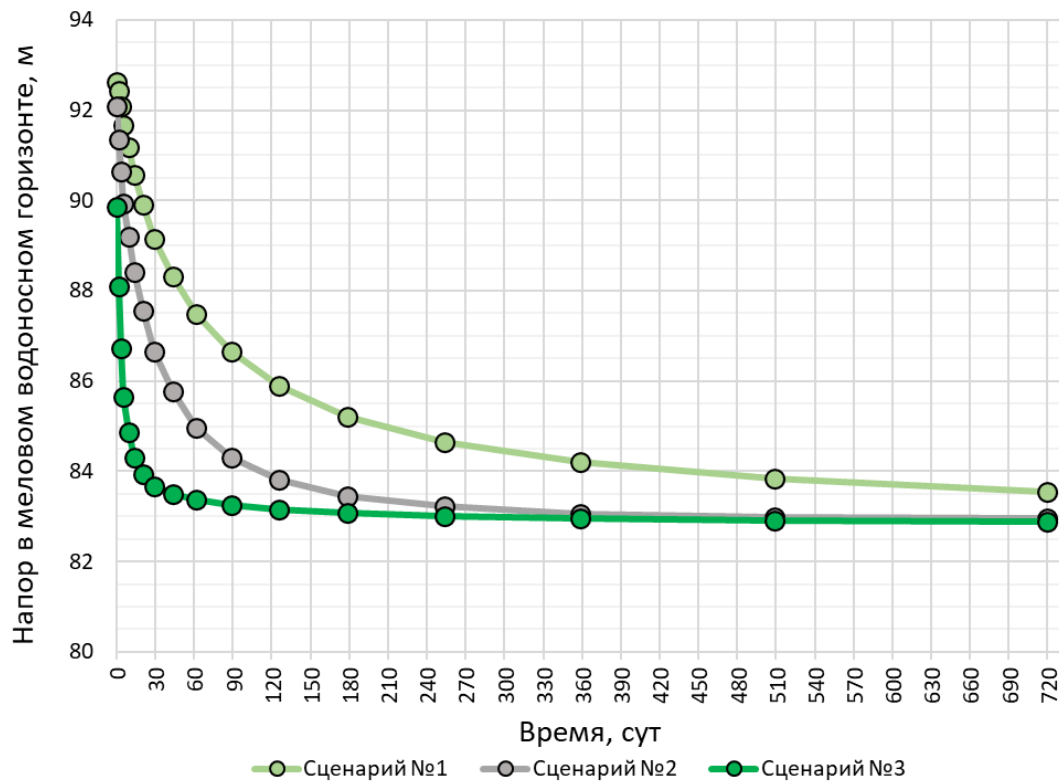


Рисунок 4.19 – График снижения напоров, контрольная точка № 2

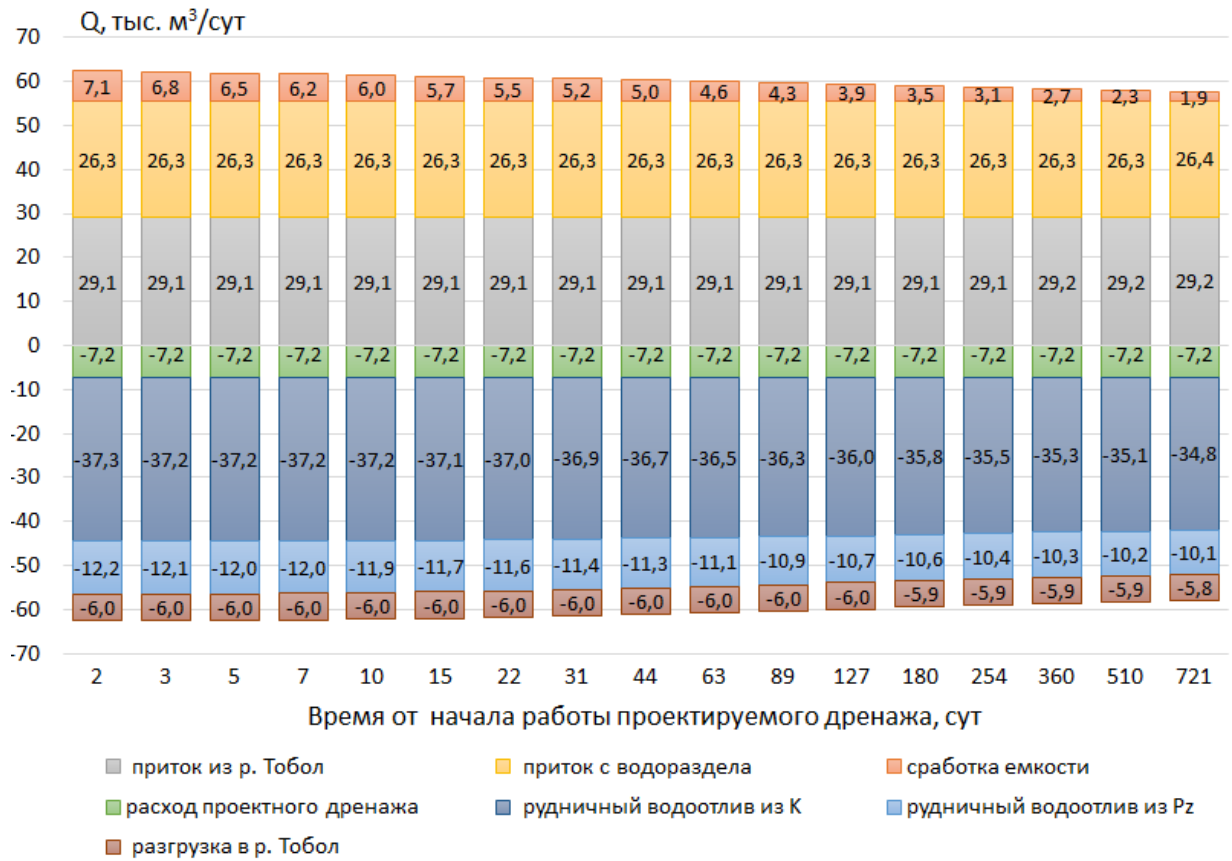


Рисунок 4.20 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 1

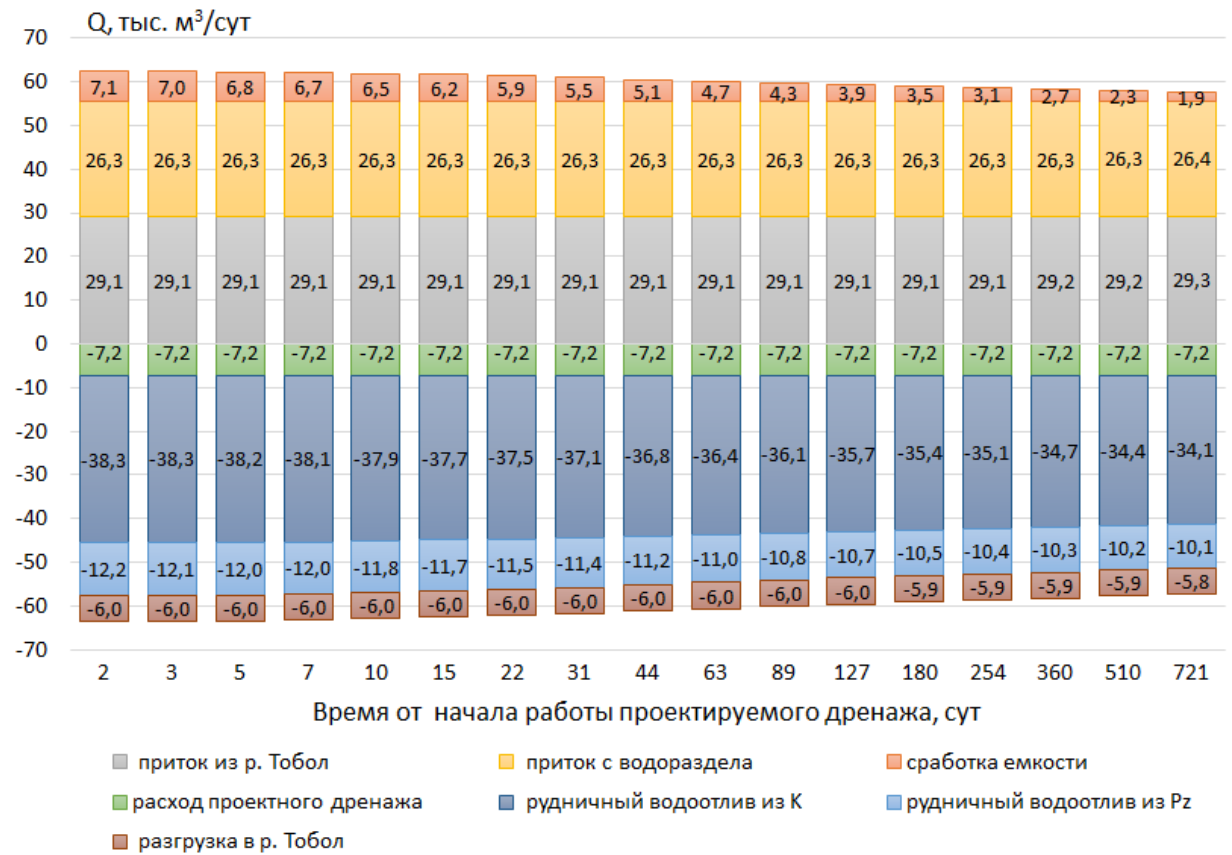


Рисунок 4.21 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 2

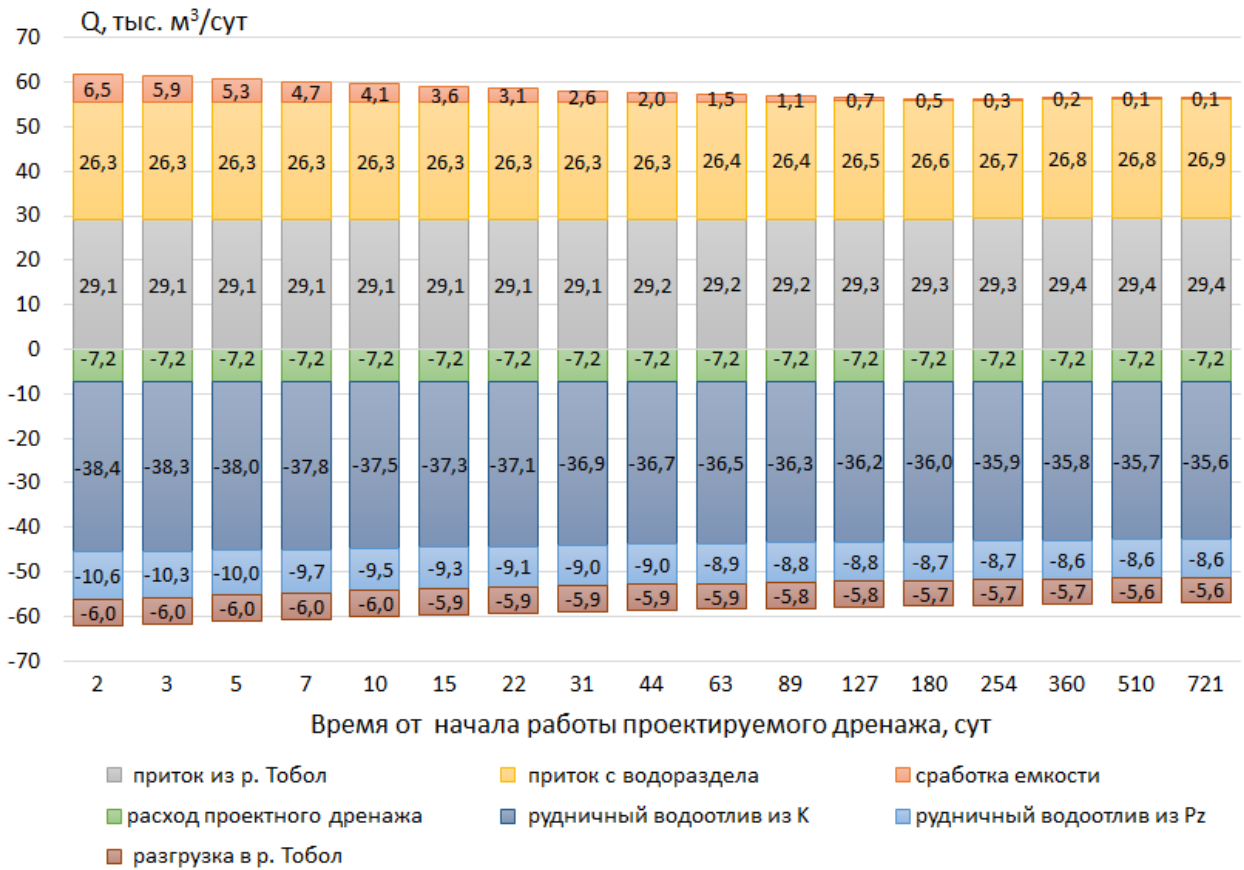


Рисунок 4.22 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 3

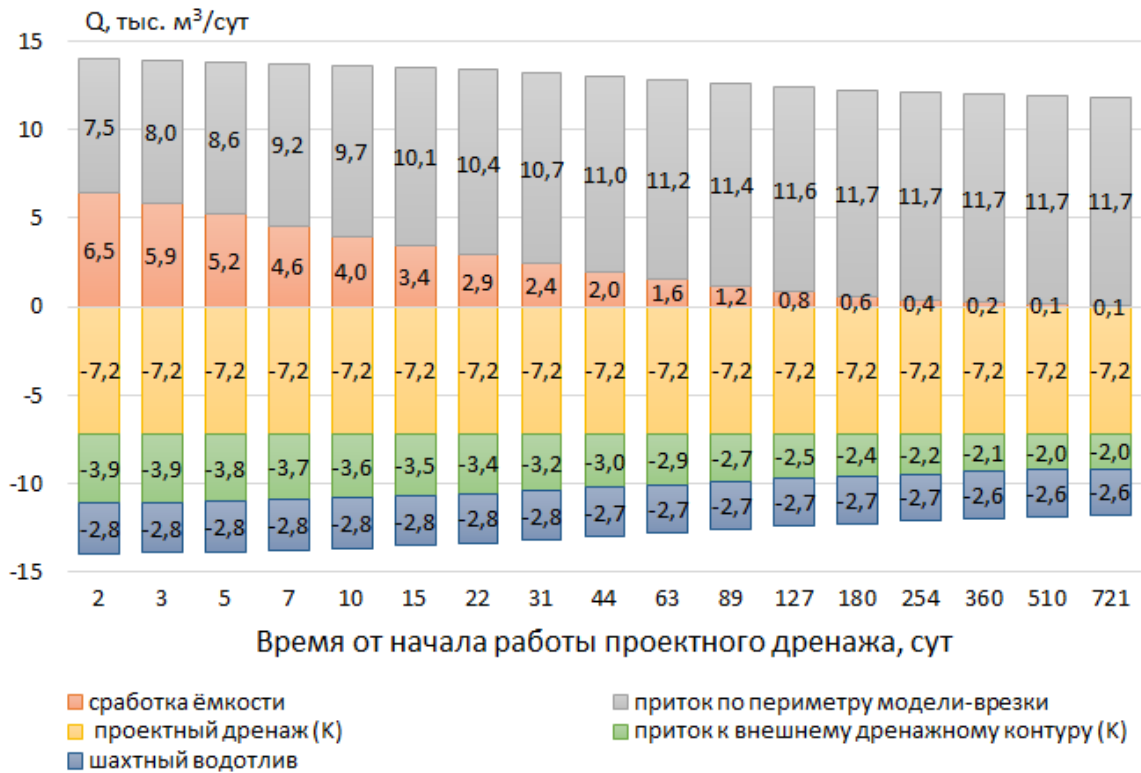


Рисунок 4.23 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 1

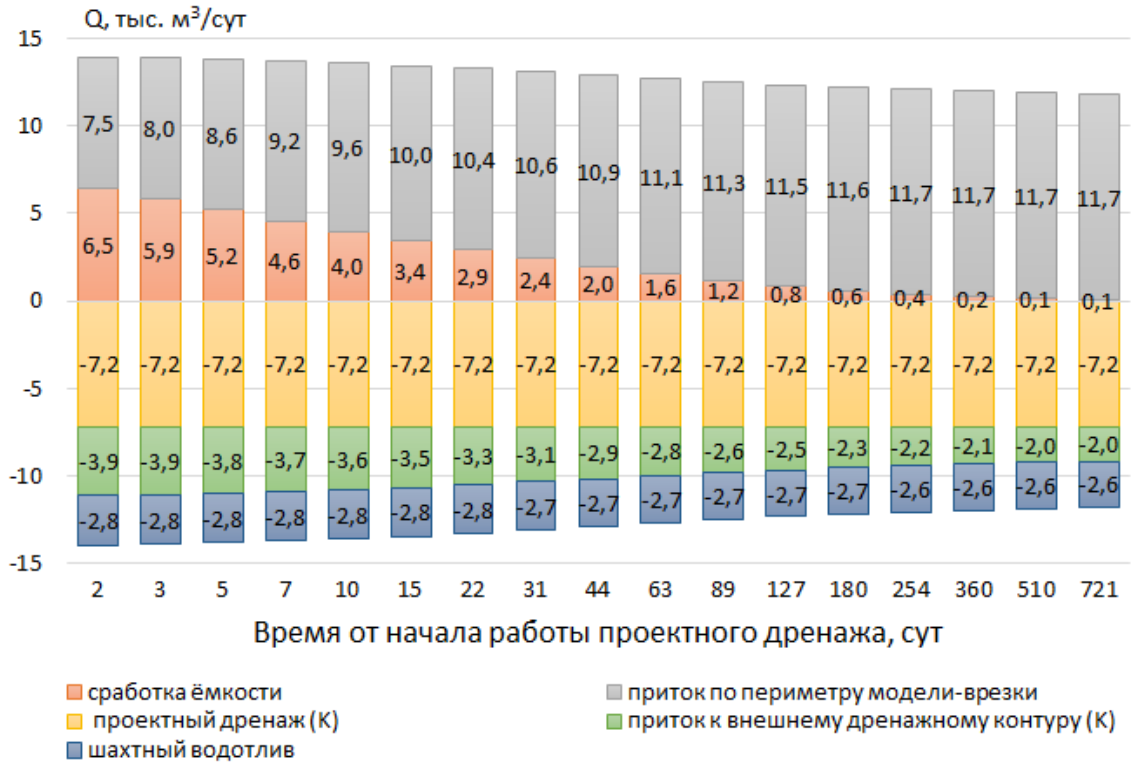


Рисунок 4.24 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 2

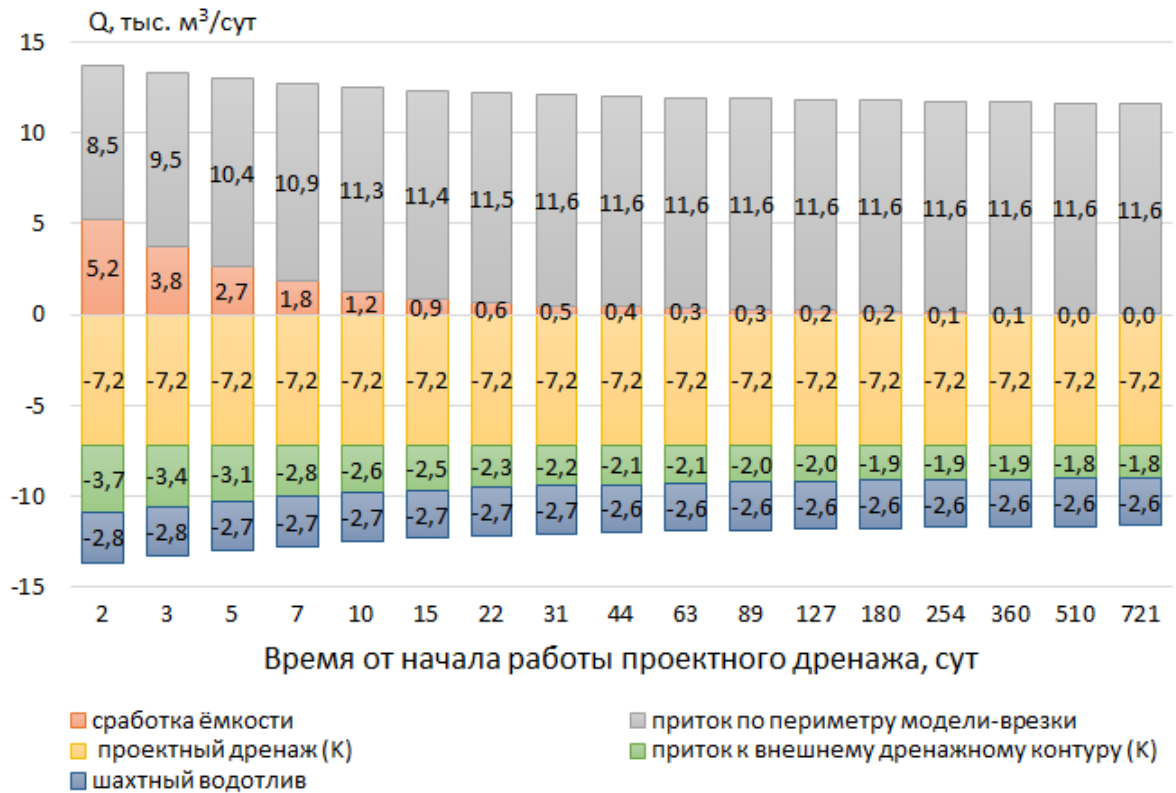


Рисунок 4.25 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 3

Из графиков снижения напоров в зоне обрушения видно, что при осушении эоцен-мелового водоносного комплекса шестью скважинами с общим расходом $7200 \text{ м}^3/\text{сут}$ снижение напоров до целевого уровня происходит менее чем за два года от начала откачки даже при худшем сценарии (сценарий № 1, с завышенными ёмкостными параметрами: упругая ёмкость массива зоны обрушения и эоцен-мелового водоносного комплекса составляет 10^{-4}).

Время снижения напоров в значительной степени зависит от ёмкости зоны обрушения. Так в сценариях № 1 и № 2 характеризуются одинаковыми значениями ёмкости эоцен-мелового комплекса ($\mu_k = 10^{-4}$) и разными значениями ёмкости зоны обрушения ($\mu_k = 10^{-4}$ и $\mu_k = 10^{-5}$, соответственно, для сценариев № 1 и № 2). Темпы сработки ёмкости при этом идентичны, (Рисунок 4.23 и Рисунок 4.24), а темп снижения уровня подземных вод заметно выше в сценарии № 2, (Рисунок 4.18).

4.3 Методика обоснования дренажа зоны обрушения

Проведенные исследования позволили разработать методику оценки фильтрационных и ёмкостных параметров дезинтегрированного массива зоны обрушения для борьбы с прорывами обводненных пород на комплексы выпуска. Методика позволяет обосновано принимать инженерные решения по осушению месторождений, разрабатываемые системами разработки с обрушением кровли: системы с блочным обрушением (block saving mining method) и с этажным обрушением (sublevel mining method). Суть методики сводится к следующим положениям:

1. Оценка горно-технических и инженерно-геологических факторов. К ним относятся геологическое строение массива горных пород, геометрия рудных тел, режим подземных вод, физико-механические и фильтрационные параметры массива пород, проектируемая или действующая система разработки.



Рисунок 4.26 – Методика обоснования дренажа дезинтегрированного массива зоны обрушения

2. Создание базы данных и геоинформационной модели месторождения, включающей данные геологического опробования, геометрии рудных тел, положения проектируемых и существующих горных выработок, фильтрационные параметры геологических элементов, временные ряды наблюдений за притоками к месторождению и положением уровня подземных вод.

3. Создание геофильтрационной модели месторождения: схематизация гидрогеологических условий, решение обратных задач, калибровка модели.

4. Оценка чувствительности модели к параметрам дезинтегрированного массива зоны обрушения с помощью набора решений обратных задач.

5. Прогноз водопритоков: выбор системы осушения, схематизация граничных условий, решение прямых фильтрационных задач, оценка графиков водопонижения, распределения напоров, уровней подземных вод.

Полученные решения могут быть использованы для выбора/анализа схем осушения, а также в качестве обоснования для проектирования дренажных систем.

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

4.4 Выводы

Разработана методика прогноза водопритоков к зоне обрушения для обоснования дренажных мероприятий с целью снижения опасности прорывов обводненных масс на комплексы выпуска. Методика базируется на оценке фильтрационных и ёмкостных параметров зоны дезинтегрированного массива зоны обрушения с помощью моделирования фильтрационных процессов.

В результате решения серии прямых задач для Соколовского месторождения получены зависимости между графиком снижения напора, водопритоками к дренажным устройствам и ёмкостными параметрами естественной геологической среды и дезинтегрированного массива зоны обрушения.

Зависимости показывают, что время, за которое происходит снижение напора, зависит в значительной степени от упругой емкости меловых песков. Так, при реализации наиболее достоверного сценария № 2 (упругая ёмкость массива зоны обрушения и эоцен-мелового водоносного комплекса составляет, соответственно, 10^{-4} и 10^{-5}), снижение напора до 82 м в центре зоны обрушения

занимает 120 суток и 510 суток в точке, наиболее удаленной от центра зоны обрушения, что объясняется более быстрым падением уровня подземных вод на участке с меньшей емкостью (при реализации сценария уплотнения дезинтегрированного массива зоны обрушения).

Установлено, что при дренаже рудного поля ш. “Соколовская” с учетом локальной морфологии эоцен-мелового водоносного комплекса, снижение напоров до уровня подошвы комплекса достигается не позднее чем 510 суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе исследован фильтрационный режим системы “дезинтегрированный массив зоны обрушения – естественная геологическая среда”, который формируется под влиянием комплекса гидрогеологических и горнотехнических условий при отработке рудных месторождений системами с обрушением. Работа проведена с целью обоснования технологии опережающего водопонижения для предотвращения прорывов воды и обводненных пластичных пород в горные выработки на примере Соколовского железорудного месторождения.

2. Исследования условий разработки рудных месторождений системами с обрушением, особенностей формирования дезинтегрированного массива, прорывов обводненных пластичных масс из зоны обрушения, а также режима фильтрации в системе «дезинтегрированный массив зоны обрушения – естественная геологическая среда», позволили установить, что прорывы образуются за счет комплексного влияния факторов, возникающих при отработке месторождений. Выделены факторы: геологические (крутопадающие, мощные рудные тела), 2) инженерно-геологические (низкая устойчивость пород кровли залежи, наличие пластичных мелкодисперсных пород, склонных к прорывам), 3) гидрогеологические (обводненные водоносные комплексы большой мощности с высокими фильтрационными свойствами), 4) горнотехнологические (технология, режим работ).

3. Выделены две группы рудных тел и зон обрушения: рудные тела, разрабатывающиеся в течении 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. Подтверждено, что в сложившихся условиях рудных тел Соколовского месторождения, относящихся к первой группе, наличие внешнего дренажного контура не обеспечивает

достаточного водопонижения для нарушения гидравлической связи дезинтегрированного массива с меловым водоносным комплексом.

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

5. Разработана и откалибрована фильтрационная модель Соколовско-Сарбайской рудной зоны, включающая эоцен-меловой и палеозойский водоносные комплексы с внешними граничными условиями, моделирующими р. Тобол и приток со стороны водораздела, и внутренними условиями, моделирующими водосборные устройства Соколовского и Сарбайского месторождений. Имитировались: открытый дренаж мелового и палеозойского водоносных комплексов карьеров Соколовский и Сарбайский, а также приток к дренажному кольцу и очистным выработкам ш. “Соколовской”. Модель калибрована на данных мониторинга притоков к дренажным устройствам и режимных наблюдений объектов Соколовского и Сарбайского месторождений.

6. Определены режимы фильтрации, соответствующие разным условиям формирования дезинтегрированного массива. Показано, что превышение фильтрационных параметров зоны обрушения над параметрами водоносного комплекса не приводит к значимому увеличению притоков к очистной зоне. Однако при малых значениях коэффициента фильтрации дезинтегрированного массива (в 10 и более раз меньше, относительно водоносного комплекса), происходит значительное снижения притока к очистной зоне.

7. Даны сценарные прогнозы водопритокков к очистной зоне при дренажных мероприятиях для разных ёмкостных параметров зоны обрушения и эоцен-мелового водоносного комплекса.

8. Разработана методика обоснования дренажных мероприятий для снижения опасности прорывов из зоны обрушения. Отличительными особенностями методики являются учет и уточнение фильтрационных и ёмкостных параметров дезинтегрированного массива в результате решения обратных задач и учет

особенностей морфологии подошвы водоносных комплексов для эффективного снижения напоров в дезинтегрированном массиве.

9. 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ПГО – песчано-глинистые отложения

ССГПО – Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение

MODFLOW – Программное обеспечение для моделирования состояния подземных вод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироненко, В. А. Горно-промышленная гидрогеология / В.А. Мироненко, Е.В. Мольский, В. Г. Румынин. – Москва : Недра, 1989. – 287 с.
2. Гидрогеологические исследования в горном деле / [В. А. Мироненко, Ю. А. Норватов, Л. И. Сердюков и др.] ; под ред. д-ра геол.-минерал. наук В. А. Мироненко. – Москва : Недра, 1976. – 352 с
3. Бабушкин, В. Д. Прогноз водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах / В. Д. Бабушкин. – Москва : Недра, 1972. – 196 с.
4. Норватов, Ю. А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод: (При освоении месторождений полезных ископаемых) / Ю. А. Норватов. – Ленинград : Недра, 1988. – 260 с.
5. Мироненко, В. А. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований) / В. А. Мироненко, Г. Румынин, В. К. Учаев. – Ленинград : Недра, 1980. – 320 с.
6. Гальперин, А. М. Геология : учебник для вузов. Ч. 4. Инженерная геология / А. М. Гальперин, В. С. Зайцев. – Москва : Горная книга : Изд-во МГГУ, 2009. – 559 с.
7. Гидрогеологические исследования в горном деле / Л. Л. Бокий, О. Ю. Кряченко, В. А. Мироненко, Е. В. Мольский, Ю. А. Норватов, А. Н. Рюмин, А. И. Сердюков, Ф. П. Стрельский. – Москва : Недра, 1976. – 352 с.
8. Стрельский, Ф. П. Условия возникновения прорывов при разжижении пористых пород под нагрузкой / Ф. П. Стрельский, Л. Л. Бокий // Физико-технические проблемы при разработке полезных ископаемых. – 1987. – № 6. – С. 103-106.
9. Butcher, R. Methods of combating mudrushes in diamond and base metal mines / R. Butcher, W. Joughin, T. R. Stacey. – Braamfontein : The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC), 2000. – 35 p.

10. Гидрогеология и охрана окружающей среды и охрана горнорудных районов северного Казахстана / В.В. Веселов, Т. Т. Махмутов, М. Б. Едигенов, В. М. Мирлас, В. К. Дейнека. – Москва : Недра, 1992. – 272 с.
11. Brown, E. T. Block Caving Geomechanics: International Caving Study 1997-2004 / E.T. Brown. – Queensland : Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 2007. – 696 p.
12. Nezhadshahmohammad, F. Draw rate optimisation in block cave production scheduling using mathematical programming / F. Nezhadshahmohammad, F. Khodayari, Y. Pourrahimian. – DOI: 10.36487/ACG_REP/1710_24_POURRAHIMIAN // UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, Perth. – P. 309-321.
13. Rashidi-Nejad, F. Open pit or block caving? A numerical ranking / F. Rashidi-Nejad, F. Suorineni, B. Asi // SOMP Annual Meeting. – Johannesburg. – 2014. – Vol. 1. – P. 183-199.
14. Tembo, A. After the deluge: Appraising the 1970 Mufulira mine disaster in Zambia / A. Tembo // Historia. – 2019. – Vol. 64, No. 2. – P. 109-131.
15. Ефремов, Е. Ю. Характеристика распределения прорывов глинистых отложений / Ефремов Е. Ю. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 331, № 12. – С. 126-134.
16. Sutton, J. R. An inquiry into the origin of the mud rushes in the de beer's mine, kimberley; covering the period january 1, 1894, to december 31, 1896 / J. R. Sutton // Transactions of the South African Philosophical Society. – 1895. – Vol. 9. – P. 54-67.
17. Cleasby, J.V. Mining practice in the Kimberley Division of De Beers Consolidated Mines Limited / J. V. Cleasby, H. J. Wright, M. T. G. Davies // journal of the south african institute of mining and metallurgy. – 1975. – Vol. 76, No. 5, December. – P. 247-272.

18. Butcher, R. Mud rushes and Methods of Combating them / R. Butcher, T. R. Stacey, W. C. Joughin // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2005. – Vol. 105, December. – P. 817-824.
19. Kuttner, R. Safety and Health at the Kimberley Diamond mines / R. Kuttner, H. G. H. Stewart // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. – 1953. – December. – P. 239-246.
20. Meyer, M. C. Proceedings at the January General Meeting, 27th January 1954 / M. C. Meyer // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1954. – Vol. 54, № 8, February. – P. 289-291.
21. Brady, B.H.G. Rock Mechanics: For Underground Mining / B. H. G. Brady, E. T. Brown. – Springer Science & Business Media, 2007. – 628 pp.
22. Review of mud rush mitigation on Kimberley's old scraper drift block caves / A. Holder, A. J. Rogers, P. J. Barlett, G. J. Keyter // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2013. – Vol. 113, № 7, January – P. 529-537.
23. Vutukuri, V. S. Mine inundation-case histories / V. S. Vutukuri, R. N. Singh // Mine Water and the Environment. – 1995. – Vol. 14, № 1, March. – P. 107-130.
24. Job, B. Inrushes at British collieries: 1851 to 1970 / B. Job // Colliery Guardian. – 1987. – Vol. 235, № 5, May. – P. 192-199.
25. Davies, A.V. Protection against Inrushes in the United Kingdom / A.V. Davies // First International Mine Water Congress of the International Mine Water Association (IMWA). – Budapest. – 1982. – Vol. 2. – P. 74-90.
26. HMSO London. The Coal and Other Mines (Precautions Against Inrushes) Regulations 1956. SI 1956 № 1769 (revoked 9 April 1979). – URL: <https://era.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/5139/A6%20SI%201956.1769%20The%20Coal%20Mines%20%28Precautions%20against%20Inflammable%20Dust%29%20Order%201956.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 14.03.2023).

27. Калмыков Е.П. Борьба с внезапными прорывами воды в горные выработки / Е. П. Калмыков. – Москва : Недра, 1973. – 240 с.
28. Bukowski, P. Water Hazard Assessment in Active Shafts in Upper Silesian Coal Basin Mines / P. Bukowski // Mine Water and the Environment. – 2011. – Vol. 30, August. – P. 302-311.
29. Bringemeier, D. Inrush and mine inundation. A real threat to Australian coal mines? / D. Bringemeier // International Mine Water Association Annual Conference, Bunbury, Australia 30.09.2012 – URL: https://www.researchgate.net/publication/281593908_Inrush_and_mine_inundation_-_A_real_threat_to_Australian_coal_mines. (дата обращения: 14.03.2023).
30. Кульбида, П. Б. Об опасностях скопления воды в породах обрушения / П. Б. Кульбида, Н. И. Горбачев, В. М. Вексельман // Безопасность труда в промышленности. – 1969. – № 7. – С. 18-19.
31. Base-metal mining methods in the Gold Fields of South Africa Group / Bryant P. E., Ayres J. B., De Beer A. R., Ross-Watt D. A. J. // XVth CMMI Congress. Johannesburg. – 1994. – Vol. 1. – P. 7-21.
32. Дубынин, Н. Г. Предотвращение прорывов глинистых пород при разработке рудных месторождений / Н. Г. Дубынин, В. Ф. Храмцов, В. С. Шеховцов. – Новосибирск : Изд-во ИГД СО АН СССР, 1989. – 124 с.
33. Об условиях безопасного ведения очистных работ при повторной подземной подработке потерянных руд в Криворожском бассейне / И. Д. Бетин, А. М. Волошин, Л. Н. Голубева, А. А. Коваленко // Известия вузов. Горный журнал. – 1972. – № 1. – С. 19-22.
34. Осипенко, Ю. С. Методические рекомендации по прогнозу прорывов песчано-глинистых пород в горные выработки / Ю. С. Осипенко, С. И. Писарев. – Белгород : ВИОГЕМ, 1984. – 25 с.
35. Именитов, В. Р. Высокопроизводительные схемы разработки крупных месторождений / В. Р. Именитов. – Москва : Госгортехиздат, 1961. – 419 с.

36. Казикаев, Д. М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд / Д. М. Казикаев. – Москва : Недра, 1981. – 288 с.
37. Усанов, С. В. Обеспечение промышленной безопасности при разработке Соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи / С. В. Усанов, А. В. Крутиков, Д. Е. Мельник. – DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082 // Проблемы недропользования. – 2018. – №. 4. – С. 82-89.
38. Далатказин, Т.Ш. Исследование минерального состава глинистых отложений коры выветривания при выполнении геодинамической диагностики для обеспечения безопасности объектов недропользования / Т. Ш. Далатказин. – DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.039 // Проблемы недропользования. – 2018. – Т. 3. – С. 39-43.
39. Navia, I. Statistical analyses of mud entry at Diablo Regimiento sector—El Teniente's Mine / I. Navia, R. Castro, M. Valencia // Proceedings of the third international symposium on block and sublevel caving. – Santiago, Chile, 2014. – P. 372–378.
40. Geotechnical characterization of ore related to mudrushes in block caving mining / R. Castro, K. Basaure, S. Palma, S. Vallejos // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2017. – Vol. 117, №. 3, April. – P. 275-284.
41. Potential hazard map for the wet muck flow prevention at the deep ore zone (DOZ) block cave mine, Papua, Indonesia / D. Wicaksono, K. Silalahi, I. Sryanto, A. Ekaputra, G. De Jong // PROSIDING TPT XXI PERHAPI 2012. 2012. – URL: https://www.researchgate.net/publication/265168957_POTENTIAL_HAZARD_MAP_FOR_THE_WET_MUCK_FLOW_PREVENTION_AT_THE_DEEP_OR_E_ZONE_DOZ_BLOCK_CAVE_MINE_PAPUA_INDONESIA/citation/download (дата обращения: 14.03.2023).
42. New perspective of wet muck risk map : lesson learned from wet muck spill in coarse fragmentation at Deep ore zone (DOZ) block caving mine, Papua, Indonesia

- / D. Wicaksono, M. R. Ramadhan, D. Hafllil, B. Antoro // Conference: proceedings TPT XXIV Dan kongres ix perhapi 2015At: Jakarta. – October, 2015 – URL: https://www.researchgate.net/publication/283335774_NEW_PERSPECTIVE_OF_WET_MUCK_RISK_MAP_LESSON_LEARNED_FROM_WET_MUCK_SPILL_IN_COARSE_FRAGMENTATION_AT_DEEP_ORE_ZONE_DOZ_BLOCK_CAVING_MINE_PAPUA_INDONESIA (дата обращения: 14.03.2023).
43. Syaifullah, T. Water issues in DOZ Block Cave Mine, PT Freeport Indonesia / T. Syaifullah, E. Widijanto, A. Srikant // Proceedings of the water in mining. Brisbane, Australia, 2006. – P. 361-368.
44. Казикаев, Д. М. Разработка рудных месторождений под водными объектами / Д. М. Казикаев, Ю. С. Осипенко. – Москва : Недра, 1989. – 192 с.
45. Агошков, М. И. Подземная разработка рудных месторождений : [учебное пособие для горных специальностей вузов] / М. И. Агошков, Г. М. Малахов. – Москва : Недра, 1966. – 663 с.
46. Именитов, В. Р. Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений : [учебник для вузов по спец. "Технология и комплекс. механизация подзем. разраб. месторождений полез. ископаемых"]. – Москва : Недра, 1978. – 528 с.
47. Основные расчеты систем разработки рудных месторождений / Г. М. Малахов, В. К. Мартынов, Г. Т. Фаустов, И. А. Кучерявенко ; под общ. ред. проф. д-ра техн. наук Г. М. Малахова. – Москва : Недра, 1968. – 275 с.
48. Laubscher, D.H. Cave Mining - State of the Art / D. H. Laubscher // Proceedings of the 6th Underground Operators' Conference, AusIMM. Kalgoorlie, 1995. – P. 279-293.
49. Bieniawski, Z. T. Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends / Z. T. Bieniawski // Rock Testing and Site Characterization. Principles, Practice and Projects, 1993. – P. 553-573.

50. Bieniawski, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering / Z. T. Bieniawski. – Wiley, 1989. – 272 p.
51. Müller L. Rock Mechanics / L. Müller. – Vienna : Springer, 1972. – 398 p.
52. Terzaghi, K. Soil mechanics in engineering practice / K. Terzaghi, R. Peck, G. Mezri. – 3rd ed. – John Wiley and Sons, Inc, 1996. – 534 p.
53. Руппенейт, К. В. Введение в механику горных пород / К. В. Руппенейт, Ю. М. Либерман. – Москва, 1960. – 356 с.
54. Авершин, С. Г. Расчет сдвижений горных пород / С. Г. Авершин. – Москва : Metallurgizdat, 1950. – 59 с.
55. Авершин, С. Г. Горные удары / С. Г. Авершин. – Москва : Углетехиздат, 1955. – 235 с.
56. Авершин, С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами / С. Г. Авершин. – Москва : Углетехиздат, 1954. – 324 с.
57. Hoek, E. Underground Excavation in Rock / E. Hoek, E. T. Brown. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. – 527 p.
58. Сашурин, А. Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии / А. Д. Сашурин. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 1999. – 168 с.
59. Сашурин, А. Д. Современная геодинамика и безопасность объектов недропользования / А. Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10. – С. 329-332.
60. Сашурин, А. Д. Роль геодинамических движений в прорывах вод в выработки при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин, Т. Ф. Харисов // Известия Томского политехнического университета. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 28-38.
61. Зубков, А. В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2001. – 335 с.

62. Hast N. The measurement of rock pressure in mines / N. Hast. – Stockholm : Norstedt, 1958. – 193 p.
63. Talobre, J. Rock Mechanics / J. Talobre. – Paris : Dunod, 1957. – 442 pp.
64. Щеголев, Д. И. Рудничные воды / Д. И. Щеголев, проф. д-р геол.-минерал. наук ; М-во угольной пром-сти зап. районов СССР. – Москва ; Харьков : Углетехиздат Западугля, 1948. – 144 с.
65. Плотников, Н. И. Подземные воды рудных месторождений / Н. И. Плотников, М. В. Сыроватко, Д. И. Щеголев. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. – 612 с.
66. Каменский, Г. Н. Гидрогеология месторождений полезных ископаемых : [учебное пособие для геол.-развед. вузов] / Г. Н. Каменский, П. П. Климентов, А. М. Овчинников ; Под ред. Г. Н. Каменского. – Москва : Госгеолиздат, 1953. – 356 с.
67. Прохоров, С. П. Методическое руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям при разведке месторождений твердых полезных ископаемых / С. П. Прохоров, Е. Г. Качугин ; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инженерной геологии ВСЕГИНГЕО М-ва геологии и охраны недр. – Москва : Госгеологтехиздат, 1955. – 232 с.
68. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых : (Метод. руководство) / В. Д. Бабушкин, Д. И. Пересунько, С. П. Прохоров, Г. Г. Скворцов ; М-во геологии СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инж. геологии "ВСЕГИНГЕО". – Москва : Недра, 1969. – 408 с.
69. Плотников, Н. И. Гидрогеология рудных месторождений / Н. И. Плотников, И. И. Рогинец. – Москва : Недра, 1987. – 286 с..

70. Троянский, С. В. Гидрогеология и осушение месторождений полезных ископаемых : [учебное пособие для горных вузов] / С. В. Троянский, А. С. Белицкий, А. И. Чекин. – Москва : Углетехиздат, 1956. – 306 с.
71. Абрамов, С. К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве / С. К. Абрамов. – Москва : Стройиздат, 1973. – 280 с.
72. Абрамов, С. К. Осушение шахтных полей и карьеров угольных месторождений / С. К. Абрамов, О. Б. Скиргелло, М. И. Чельцов. – Москва : Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горному делу, 1961. – 400 с.
73. Абрамов, С. К. Водозаборы подземных вод / С. К. Абрамов, М. П. Семенов, А. М. Чалищев. – 2-е изд., (перераб.). – Москва : Госстройиздат, 1956. – 256 с.
74. Мироненко, В. А. Динамика подземных вод / В. А. Мироненко. – Москва : Московский Государственный горный университет, 2001. – 519 с.
75. Мироненко, В. А. Дренаж карьерных полей / В. А. Мироненко, Г. Л. Фисенко. – Москва : Недра, 1972. – 184 с.
76. Норватов, Ю. А. Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий / Ю. А. Норватов, И. Б. Петрова. – Санкт-Петербург : СПБ ВНИМИ, 2008. – 79 с.
77. Гальперин, А. М. Гидрогеология и инженерная геология : учебное пособие / А. М. Гальперин, В. С. Зайцев, Ю. А. Норватов. – Москва : Недра, 1989. – 382 с.
78. Геология : учебник для вузов. Часть 3. Гидрогеология / А. М. Гальперин, В. С. Зайцев, Ю. А. Норватов, Г. Н. Харитоненко. – Москва : Московский государственный горный университет, 2009. – 400 с.

79. Стрельский, Ф. П. Оценка условий подработки водных объектов методом наблюдений за поровым давлением / Ф. П. Стрельский, А. С. Миронов // Труды ВНИМИ. – Москва : ВНИМИ, 1977. – Т. 106. – С. 36-41.
80. Широков, А. П. Предупреждение прорывов глины в горные выработки / А. П. Широков, Ю. Н. Кулаков, Л. М. Синельников. – Москва : Недра, 1972. – 184 с.
81. Быстров, Г. А. Разработка мощных крутых угольных пластов, опасных по прорыву глин / Г. А. Быстров, А. П. Филлипов, И. Ф. Башев. – Москва : ЦНИИЭИ-уголь, 1971. – 45 с.
82. Норватов, Ю. А. Гидрогеомеханическое обеспечение горных работ при строительстве подземных сооружений / Ю. А. Норватов, И. Б. Петрова, В. В. Назима // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики : сборник докладов конференции. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ. – 2002. – С. 322-329.
83. Оловянный, А. Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород / А. Г. Оловянный. – Санкт-Петербург. 2003. – 234 с.
84. Котлов О. Г. Научно-методические принципы гидрогеологического мониторинга при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей в песчано-глинистых отложениях : на примере участка Санкт-Петербургского метрополитена между станциями "Лесная" - "Площадь мужества" : диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.07 / Котлов Олег Николаевич; [Место защиты: С.-Петерб. гос. гор. ин-т им. Г.В. Плеханова]. – Санкт-Петербург, 2007. – 138 с.
85. Назима В. В. Гидрогеологическое обеспечение горных работ при строительстве подземных сооружений в песчано-глинистых отложениях : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.16 / В. В. Назима ; НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела. – Санкт-Петербург, 2005. – 130 с.

86. Мельник, В. Г. Исследование факторов, влияющих на прочностные свойства связных грунтов с крупнозернистыми включениями / В. Г. Мельник, Н. Я. Халитов // Труды института ВОДГЕО. – Москва : ВОДГЕО, 1980. – С. 22-24.
87. Федоров, В. И. Влияние глинистого заполнителя на прочностные характеристики щебенисто-глинистых грунтов / В. И. Федоров, В. В. Сергеевнина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1973. – №. 6. – С. 13-15.
88. Казикаев, Д. М. Моделирование обводненных пльвуноподобных пород / Д. М. Казикаев, Б. Н. Болотов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1978. – № 6. – С. 114-117.
89. Methodology for evaluation of mud rush risk in block caving mining / J. Vallejos, K. Basaure, S. Palma, R. L. Castro // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2017. – Vol. 117, No. 5, may. – P. 491-497.
90. Bingham, E. C. An Investigation of the Laws of Plastic Flow / E. C. Bingham // Bulletin of the Bureau of Standards. – 1916. – Vol. 13, No. 2. – P. 309-353.
91. Уилкинсон, У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1964. – 216 с.
92. Sanchez, K. Numerical Modelling of Water Flow Through Granular Material for Isolated and Simultaneous Extractions in Block Caving / K. Sanchez, S. Palma, R. Castro // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2019. – Vol. 52. – P. 133-147.
93. Durlofsky, L. Analysis of the Brinkman equation as a model for flow in porous media / L. Durlofsky, J. F. Brady // The Physics of Fluids. – 1998. – Vol. 30, No. 11. – P. 3329.
94. Kvapil, R. Gravity flow of granular material in hoppers and bins. Part 1 / R. Kvapil // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1965. – Vol. 2. – P. 35-41.

95. Kvapil, R. Gravity flow of granular material in hoppers and bins. Part 2 / R. Kvapil // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1965. – Vol. 2. – P. 277-304.
96. Collins, R. E. Flow of fluids through porous materials / R. E. Collins. – New York : Reinhold publishing corporation, 1961. – 270 p.
97. Ривкин, И. Д. Условия устойчивости пустот над выработанным пространством слепых рудных залежей / И. Д. Ривкин, В. М. Кучер // *Безопасность труда в промышленности*. – 1969. – № 8. – С. 48-50.
98. Quantifying Wet Muck Entry Risk for Long-term Planning in Block Caving / R. Castro, D. Garces, A. Brzovic, F. Armijo // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – Vol. 51. – P. 2965-2978.
99. Jakubec, J. Mudrush risk evaluation / J. Jakubec, R. Clayton, A. Guest // *Proceedings of the sixth international conference & exhibition on mass mining*. – CIM Journal, Vol. 7, No. 1, 2016. – URL: <https://store.cim.org/en/mudrush-risk-evaluation> (дата обращения: 15.03.2023).
100. Underground Geological Database Management System for Mapping Process Improvement, Case Study of Deep Ore Zone (DOZ) Mine, PT Freeport Indonesia / H. Setyadi, L. Widodo, H. Setiono, L. Soebari // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2013. – Vol. 6. – P. 70-76.
101. Hosmer, D. Applied logistic regression / D. Hosmer, S. Lemeshow, R. Sturdivant. New York : Wiley, 2013. – 398 pp.
102. The management of wet muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine / E. Samosir, J. Basuni, E. Widijanto, T. T. Syaifullah // *Proceedings of The Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Ontario, Canada. 2008. – P. 323–332.
103. 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.
104. Соколовское магнетитовое месторождение : Геология, разведка, перспективы / [Н.И. Руденко, А.И. Москаленко, Т.Б. Баяндаров и др.] ; под ред. В.И. Тернового. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1979. – 247 с.
105. Едигенов, М. Б. Гидрогеология рудных месторождений Северного Казахстана / М. Б. Едигенов. – Костанай, 2013. – 308 с.
106. 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.
107. 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.
108. Ефремов, Е.Ю. Анализ источников водного питания прорывов глинистых отложений в горные выработки Соколовского месторождения / Е. Ю. Ефремов. – DOI: 10.25018/0236-14932020-31-0-56-67 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 56-68
109. 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
110. 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.
111. 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.
112. Бетин, Д. И. Об условиях повторной разработки забалансовых и потерянных руд под водоемами и скрытыми очагами разжиженных грунтов в зонах обрушения / Д. И. Бетин, А. М. Волошин, Л. Н. Голубева // Научные труды НИГРИ. – Москва, 1970. – Т. 14. С. 80-83.
113. Harbaugh, A. W. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – the Ground-Water Flow Process : U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6 / A. W. Harbaugh – Reston: U.S. Geological Survey, 2005.– <https://doi.org/10.3133/tm6A16>
114. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – Москва : Наука, 1977. – 664 с
115. Основы гидрогеологических расчетов / Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков. – Москва : Недра, 1965. – 306 с.
116. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model / C. D. Langevin, J. D. Hughes, E. R. Banta, R. G. Niswonger, S. Panday, A. M. Provost. – U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55. 103133655th ed. 2017. – 197 p.
117. Ефремов, Е. Ю. Обоснование завершения критерия воронкообразования / Е. Ю. Ефремов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – Т. 4. – С. 12-21.

118. 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.
119. 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.

СПИСОК РИСУНКОВ

Рисунок 1.1 – Последствия прорыва пород на руднике El Teniente, Чили	14
Рисунок 1.2 – Последствия прорыва пород на ш. «Соколовская», Республика Казахстан.....	15
Рисунок 1.3 – Последствия прорыва пород на руднике Dutoitspan, ЮАР, 2015 г.	15
Рисунок 1.4 - Схема выработок, заваленных породой в результате аварии на руднике Dutoitspan, ЮАР, 2011 г [21].....	19
Рисунок 1.5 – Статистика прорывов подземных вод к месторождениям Силезского бассейна в период с 1944 по 2008 гг. [28].....	21
Рисунок 1.6 - Диаграмма Лобшира.....	27
Рисунок 1.7 – Схема формирования условий прорывов обводненных масс из зоны обрушения: а – начальная стадия образования зоны обрушения, б – конечная стадия развития зоны обрушения, со 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	38
Рисунок 1.8 – Методы борьбы с прорывами обводненных масс.	42
Рисунок 2.1 – Ситуационный план Соколовско-Сарбайской железорудной группы месторождений	46
Рисунок 2.2 – Гидрогеологическая карта района исследований.....	49
Рисунок 2.3 – Продольный гидрогеологический разрез Соколовского месторождения в направлении север-юг	50
Рисунок 2.4 – Схема дренажного комплекса ш. “Соколовская”. Цифрами обозначены: 1) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) с низкой трещиноватости, 2) Скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.)	

<i>средней трещиноватости, 3) скальные палеозойские породы (скарны, порфириты и др.) высокой трещиноватости, 4) кора выветривания палеозойских пород, 5) меловые пески, 6) опоки эоценовые, 7) глины чеганские, 8) пески олигоценовые, 9) пески четвертичные, 10) суглинки четвертичные, 11) супеси четвертичные, 12) дезинтегрированный массив.....</i>	54
Рисунок 2.5 – Водоприток к дренажной системе ш. “Соколовская” с 2007 г. по 2018 г., м ³ /ч	56
Рисунок 2.6 – Диаграмма рассеяния данных мониторинга водопритоков к дренажу ш. “Соколовская”	57
Рисунок 2.7 – Состояние земной поверхности ш. “Соколовская” в 2017 г.	58
Рисунок 2.8 – Развитие зоны обрушения в результате отработки первых трех рабочих комплексов: -60 м, -120 м и -190 м [60].	59
Рисунок 2.9 – Зона воронкообразования Соколовского месторождения.....	60
Рисунок 2.10 – Пространственное распределение прорывов глинистых отложений (ПГО) в горные выработки ш. “Соколовская”	64
Рисунок 2.11 – Диаграмма рассеяния удельного объема отложений, вышедших в горные выработки из зоны обрушения	65
Рисунок 2.12 – Морфология подошвы эоцен-мелового комплекса, <i>справа шкала отметок морфологии подошвы</i>	67
Рисунок 3.1 – Схема граничного условия первого рода на границе потока подземных вод: H_1 – начальный уровень подземных вод, H_2 – изменившийся уровень подземных вод вследствие изменения уровня воды в реке.....	74
Рисунок 3.2 – Схема граничного условия второго рода: H_1 – начальный уровень подземных вод, H_2 – изменившийся уровень подземных вод вследствие откачки из скважины	75
Рисунок 3.3 – Схема граничного условия третьего рода: H_1 – уровень подземных вод верхнего водоносного комплекса, H_2 – напор подземных вод нижнего водоносного комплекса. $q(l)$ – расход подземных вод, фильтрующихся через слабопроницаемый слой, k_c – коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя, m_c – мощность слабопроницаемого слоя.....	75

- Рисунок 3.4 – Схема граничного условия четвертого рода: Фиолетовым цветом выделена граница двух водоносных комплексов в зоне сатурации. Голубым пунктиром показан первоначальный уровень грунтовых вод. Голубой сплошной изменившийся уровень H_{11} – уровень подземных вод первого водоносного комплекса на границе фильтрации, H_{12} – уровень подземных вод второго водоносного комплекса на границе фильтрации. q_{11} – расход подземных вод первого водоносного комплекса на границе фильтрации. q_{12} – расход подземных вод второго водоносного комплекса. 76
- Рисунок 3.5 – Схема расчета внутреннего потока между ячейками..... 77
- Рисунок 3.6 – Концептуальная фильтрационная модель зоны дезинтегрированного массива зоны обрушения. k_n , μ_n – коэффициенты фильтрации и ёмкости гидрогеологических элементов (1, 2, 3 – слои, 4 – зона обрушения), C_1 , H_1 – фильтрационное сопротивление и отметка дрены 81
- Рисунок 3.7 – Схема геофильтрационной модели района Соколовско-Сарбайского железорудного комплекса. Сгущение сети ограничено периметром внутреннего дренажа (красный цвет). Q – расход дренажа, тыс. $m^3/сут$, K – эоцен-меловой водоносный комплекс, Pz – палеозойский водоносный комплекс. Зона обрушения на рисунке совпадает с внутренним дренажем. 82
- Рисунок 3.8 – Стратификация и характеристики фильтрационной модели. H – абсолютные отметки, t – мощность, k – коэффициент фильтрации..... 84
- Рисунок 3.9 – Зависимость притоков к очистным работам от коэффициента фильтрации массива зоны обрушения. $k_{зо}$ – коэффициент фильтрации зоны обрушения, k – коэффициент фильтрации естественно залегающих отложений эоцен-мелового комплекса 89
- Рисунок 4.1 – Концепция модернизации дренажной системы шахты “Соколовская” с учетом особенностей морфологии подошвы мелового водоносного комплекса. (Цветовой шкалой показаны изогипсы подошвы эоцен-мелового комплекса) 92
- Рисунок 4.2 – Распределение уровней подземных вод в эоцен-меловом водоносном комплексе 95

Рисунок 4.3 – Распределение уровней подземных вод в палеозойском водоносном комплексе	95
Рисунок 4.4 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе до начала откачки	98
Рисунок 4.5 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе до начала откачки	98
Рисунок 4.6 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 1, 72 сут после начала откачки.....	99
Рисунок 4.7 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 1, 72 сут после начала откачки.....	99
Рисунок 4.8 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 1, 720 сут после начала откачки.....	100
Рисунок 4.9 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 1, 720 сут после начала откачки.....	100
Рисунок 4.10 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 2, 31 сут после начала откачки.....	101
Рисунок 4.11 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 2, 31 сут после начала откачки.....	101
Рисунок 4.12 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 2, 720 сут после начала откачки.....	102
Рисунок 4.13 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 2, 720 сут после начала откачки.....	102
Рисунок 4.14 – Распределение напоров в эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 3, 31 сут после начала откачки.....	103
Рисунок 4.15 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 3, 31 сут после начала откачки.....	103
Рисунок 4.16 – Распределение напоров эоцен-меловом водоносном комплексе, сценарий № 3, 720 сут после начала откачки.....	104
Рисунок 4.17 – Распределение напоров в палеозойском водоносном комплексе, сценарий № 3, 720 сут после начала откачки.....	104

Рисунок 4.18 – График снижения напоров, контрольная точка № 1	105
Рисунок 4.19 – График снижения напоров, контрольная точка № 2	105
Рисунок 4.20 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 1	106
Рисунок 4.21 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 2	106
Рисунок 4.22 – Баланс модели в нестационарной постановке, сценарий № 3	107
Рисунок 4.23 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 1	107
Рисунок 4.24 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 2	108
Рисунок 4.25 – Баланс модели по периметру внешнего дренажного контура, сценарий № 3	108
Рисунок 4.26 – Методика обоснования дренажа дезинтегрированного массива зоны обрушения	110

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таблица 1.1 – Классификация прорывов обводненных пород в горные выработки.....	17
Таблица 1.2 – Статистика смертности на угольных рудниках Китая, США, Индии и Австралии с 2002 по 2012 гг.....	22
Таблица 1.3 – Классификация руды рудника IOZ mine по степени опасности прорывов.....	31
Таблица 2.1 – Водоприток к дренажной системе ш. “Соколовская” с 2007 г. по 2018 г.; м ³ /ч.....	55
Таблица 2.2 – Классификация прорывов глинистых отложений на комплексы выпуска.....	62
Таблица 3.1 – Схематизация граничных условий.....	85
Таблица 3.2 – Притоки к дренажному комплексу ССГПО.....	88
Таблица 4.1 – Емкостные параметры фильтрационной модели.....	93