

На правах рукописи

Горбунова

ГОРБУНОВА Элла Михайловна

**РЕАКЦИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА
НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 1.6.6. – Гидрогеология

1.6.9. – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

МОСКВА – 2022 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук

Научный консультант: **Кочарян Геворг Грантович,**
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты: **Абукова Лейла Азретовна,**
доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая лабораторией, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва;

Дутова Екатерина Матвеевна,
доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск;

Кузьмин Юрий Олегович,
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва.**

Защита диссертации состоится « 30 » июня 2022 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета 24.1.062.01 при ФГБУН Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНЦ СО РАН (г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.128) и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull203/3015.pdf>

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета к.г.-м.н. Бабичевой Виктории Аркадьевне.

Тел.: 89148816658, факс: (3952)42-69-00, e-mail: khak@crust.irk.ru

Автореферат разослан « » апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геол.-мин. наук



В.А. Бабичева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия. В качестве характеристики режима деформирования водонасыщенного коллектора под влиянием квазистационарных (атмосферное давление, земные приливы) и периодических (отклики на землетрясения, взрывы) факторов рассматриваются вариации уровня подземных вод и давления в системе «пласт-скважина».

Актуальность.

В соответствии с «Основами государственной политики в области использования минерального сырья и недропользования» к приоритетным направлениям деятельности отнесены охрана недр и рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов, оценка и прогноз состояния недр на территориях, подверженных опасным природно-техногенным процессам. Особенности геологического строения региона определяют условия распространения многослойных толщ коллекторов порового, трещинно-пластового и трещинно-жильного типов, которые различаются по степени водонасыщенности, гидростатическому напору, гидравлической взаимосвязи. Этим объясняется многообразие гидрогеологических эффектов при динамическом воздействии: от фонтанирования скважин, скачкообразных и постепенных изменений уровня подземных вод до вариаций давления в системе «пласт-скважина», вызванных прохождением сейсмических волн от землетрясений и взрывов.

Изменения структуры порово-трещинного пространства водонасыщенного коллектора и порового давления под влиянием квазистационарных факторов – атмосферного давления, земных приливов и периодических – откликов на землетрясения, взрывы, промышленные откачки-нагнетания, необходимо учитывать в процессе неравномерного инженерно-технического освоения подземного пространства, эксплуатации месторождений, трасс нефте- и газопроводов. Нарушение гидрогеодинамической обстановки приводит к негативным геозкологическим последствиям и способствует активизации карстово-суффозионных и оползневых процессов, наведенной микросейсмичности, которые наиболее значимо выражены в пределах территорий, характеризующихся высокой степенью техногенной нагрузки и высокой плотностью населения. В информационно-аналитических отчетах Центра государственного мониторинга недр за 2018-2020 гг. отмечено увеличение площади распространения опасных экзогенных геологических процессов в России и их интенсивности.

В силу этого исследование реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия является актуальной задачей. Определение основных типов гидрогеологических откликов в широком диапазоне частот, соответствующих различным режимам деформирования водонасыщенного коллектора, может быть использовано для выявления потенциально неустойчивых зон и прогнозной оценки изменений несущих свойств грунтов – одной из задач детального сейсмического районирования. Для своевременной разработки мер защиты особо ответственных объектов, в том числе и памятников культурного наследия, целесообразно проведение дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод. Исследование механизма деформирования водонасыщенного коллектора является важной задачей, которая имеет как прикладное, так и фундаментальное значение, поскольку направлено на качественное понимание и количественное описание геомеханических и гидрогеодинамических процессов, происходящих в водонасыщенном коллекторе.

Целью исследования является:

- определение основных закономерностей реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия различной интенсивности;
- развитие метода дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора.

Основные задачи исследования:

1. Систематизация экспериментальных данных по реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия различной интенсивности по данным гидрогеологического мониторинга.

2. Установление взаимосвязи между изменениями гидрогеодинамической обстановки и формированием областей поствзрывных деформаций в вмещающем массиве горных пород и на дневной поверхности при крупномасштабных взрывах.

3. Разработка метода дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора по данным гидрогеологического отклика на земные приливы, землетрясения, взрывы и другие техногенные факторы.

3. Выявление различий гидрогеологических эффектов, зарегистрированных в массиве и зонах влияния структурных нарушений при динамическом воздействии.

5. Определение соответствия между основными типами гидрогеологических откликов и режимами деформирования водонасыщенного коллектора в естественных и техногенно-нарушенных условиях.

6. Разработка феноменологической модели реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия.

Фактический материал:

При подготовке работы использованы:

- данные, полученные автором работы при проведении экспериментальных исследований по изучению реакции геологической среды на взрывное воздействие на площадках «Балапан» и «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона (СИП) в 1983-1992 гг.;

- данные прецизионного мониторинга уровня подземных вод, организованного автором и проводимого на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») с 2008 г. и в промышленном регионе вблизи г. Губкин Белгородской области с 2019 г. по настоящее время;

- опубликованные результаты исследований по оценке проницаемости коллекторов по гидрогеологическому отклику на вариации атмосферного давления и земные приливы; определению изменений проницаемости водонасыщенных коллекторов, связанных с прохождением сейсмических волн; реакции подземных вод на взрывы и землетрясения.

Основные методы исследования:

- обобщение и анализ экспериментальных данных по изменению состояния массива, гидрогеодинамической обстановки и формированию областей поствзрывных деформаций дневной поверхности при крупномасштабных взрывах;

- определение фильтрационных параметров водонасыщенного коллектора в платформенных условиях по данным прецизионной регистрации вариаций уровня подземных вод в естественных и техногенно-нарушенных условиях;

- изучение и типизация гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений по данным регистрации на территории ГФО «Михнево»;

- исследование реакции системы «пласт-скважина» на проведение массовых взрывов при разработке железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА).

Отличие научно-методического подхода, использованного в настоящей работе, от предшествующих исследований по данной тематике состоит в комплексировании результатов оценки изменений эффективных (физико-механических, фильтрационных) характеристик водонасыщенного коллектора в условиях естественного и техногенного воздействий на вмещающий массив горных пород и зоны структурных нарушений. Анализ гидрогеологических эффектов, зарегистрированных в процессе эксплуатации месторождений с использованием взрывных технологий, рассматривается на основе амплитудно-частотных характеристик системы «пласт-скважина».

Достоверность и надежность представленных результатов по исследованию реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия подтверждена хорошей сходимостью экспериментальных данных, полученных при выполнении исследований на отдельных участках Семипалатинского полигона, территории ГФО «Михнево» и в пределах разрабатываемых месторождений КМА, с опубликованными данными по изучению гидрогеологических откликов на экзогенное, эндогенное и техногенное воздействие. Используемые методы и подходы к решению задач диссертационной работы соответствуют современному мировому уровню исследований, что подтверждается их апробацией в ведущих зарубежных журналах [Besedina et al., 2016; Gorbunova, 2021; Vinogradov et al., 2017]¹ и материалах международных конференций [Gorbunova et al., 2018a,b; Gorbunova, Besedina, 2019; Kabychenko et al., 2019, 2020].

Защищаемые положения.

1. Разработана методика дистанционной оценки фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора, которая может применяться при анализе гидрогеологических эффектов, регистрируемых при взрывах и землетрясениях. Вариации уровня подземных вод используются в качестве индикатора естественных и техногенно-нарушенных условий массива горных пород. При прецизионном гидрогеологическом мониторинге, направленном на исследование фазового сдвига между приливной волной M_2 , выделенной в смещении грунта и уровнем водоносного горизонта, необходимо учитывать фоновые вариации уровня подземных вод, связанные с влиянием сезонных факторов и техногенным воздействием. Предложенный научно-методический подход использован при создании невозмущающего метода оценки негативных последствий динамических воздействий различной интенсивности.

2. Область нарушения гидрогеодинамической обстановки в ближней зоне крупномасштабных взрывов и землетрясений определяется необратимыми изменениями физико-механических и фильтрационных свойств массива горных пород, которые установлены как в эпицентральной зоне, так и локально, на участках, приуроченных к структурным нарушениям (разломам, границам раздела выветрелых и относительно монолитных пород, литолого-стратиграфическим контактам и т.п.). Вариации основных параметров подземного потока, на порядок превышающие фоновые, подтверждают наличие гидравлической взаимосвязи водоносных горизонтов с зонами наведенной трещиноватости. Постепенное и/или скачкообразное изменение уровня с последующей стабилизацией режима подземных вод в зоне воздействий средней интенсивности (промежуточной зоне) при величине максимальной скорости смещения грунта $PGV \sim 1-100$ см/с свидетельствует о локальном изменении фильтрационных свойств коллектора.

3. Пороупругая реакция водонасыщенного коллектора на динамическое воздействие в дальней зоне в платформенных условиях при PGV менее 1 см/с проявляется в виде осцилляции уровня продолжительностью от первых секунд до первых десятков минут. В природной геосистеме на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» косейсмические амплитуды уровня от 3 до 110 мм зарегистрированы при PGV от 0.4 до 4 мм/с. В пределах природно-техногенной геосистемы разрабатываемых железорудных месторождений КМА вариации давления в системе «пласт-скважина» при массовых взрывах изменяются от 13 кПа до 20 Па на приведенных расстояниях от 60 до 400 м/кг^{1/3} при PGV от 20 до 0.2 мм/с.

4. Зависимость амплитуды вариаций гидрогеологических откликов от параметра PGV при сейсмическом действии взрывов и землетрясений имеет степенной характер. Основанная на анализе амплитудно-частотных параметров системы «пласт-скважина» типизация гидрогеологических эффектов, регистрируемых в дальней, промежуточной и ближней зонах, соответствует пороупругому, квазиобратимому и необратимому изменению порово-трещинного пространства водонасыщенного коллектора.

¹ Библиографические ссылки здесь и далее приведены в диссертации.

5. Предложенная феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие учитывает подобие и типизацию гидрогеологических откликов, выделенных при взрывах и землетрясениях, и может быть использована для ранжирования территории на ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны. Прослеженную взаимосвязь между режимом деформирования коллектора и установленными гидрогеологическими эффектами следует учитывать при взаимодействии сооружений высокого уровня ответственности (АЭС, ускорителей, объектов захоронения РАО и др.) с геологической средой.

Научная новизна.

Данная работа представляет собой первое обобщающее исследование, в котором:

- на основе реакции подземных вод на крупномасштабные взрывы детально проанализирована взаимосвязь между изменениями физико-механических и фильтрационных свойств массива горных пород и гидрогеодинамической обстановки;
- определена эффективность дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора в платформенных условиях по результатам прецизионного мониторинга подземных вод;
- впервые выполнена совместная интерпретация гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при взрывах и землетрясениях, и установлено подобие реакции водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие;
- впервые выполнен анализ реакции системы «пласт-скважина» в процессе разработки железорудных месторождений с использованием взрывных технологий.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе реакции подземных вод на проведение крупномасштабных взрывов, массовых промышленных взрывов и сопоставлении полученных результатов с косейсмическими и постсейсмическими эффектами от землетрясений, зарегистрированными в платформенных условиях и сейсмоактивных регионах. Подобный методический подход может быть использован для исследования геомеханики процессов, происходящих в ближней зоне землетрясений, которая малоизучена из-за недостаточного количества инструментальных измерений.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость проведенных исследований заключается в развитии метода дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора и разработке феноменологической модели, отражающей взаимосвязь между режимами деформирования водонасыщенного коллектора и зарегистрированными гидрогеологическими эффектами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в анализе результатов высокоинтенсивного воздействия на водонасыщенный коллектор и проведении прецизионных наблюдений за вариациями уровня подземных вод и давления в системе «пласт-скважина», которые необходимы для контроля негативных последствий ведения техногенной деятельности.

Разработанные научные основы дистанционного мониторинга фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора в платформенных условиях и созданная феноменологическая модель могут оказаться востребованными при ведении горных работ с использованием взрывных технологий, закачке промышленных отходов в глубокие горизонты и других, влияющих на развитие и интенсивность природно-техногенных процессов (карст, суффозия, наведенная микросейсмичность и т.п.).

Тема диссертации соответствует Программе фундаментальных научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук.

Личный вклад автора.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно. Часть исследований выполнялась совместно со старшими научными сотрудниками лаборатории «деформационных процессов в земной коре» ИДГ РАН,

кандидатами физико-математических наук – Бесединой А.Н. и Виноградовым Е.А., кандидатами технических наук – Кабыченко Н.В. и Свинцовым И.С. Автору принадлежат постановка задачи и руководство работой по обработке данных и анализу результатов. Автор организовал проведение прецизионного гидрогеологического мониторинга с 2008 г. на территории ГФО «Михнево», с 2019 г. – в промышленном регионе вблизи г. Губкин Белгородской области. В период 1983-1998 гг. инициировал выполнение специальных работ по изучению реакции подземных вод на взрывы в пределах СИП. Часть работ, посвященных анализу изменений состояния массива горных пород при взрывном воздействии, выполнена совместно с сотрудниками партии 27 ПГО «Гидроспецгеология» – кандидатом физико-математических наук Шпаковским В.И., Шпаковской Р.С., Полещук В.Н., Полещук Р.Ф., Русиновой Л.А., Степиным А.И., Добрыниным В.Н., Вальковой М.А.

Автор являлся руководителем проектов РФФИ 12-05-00956 «Контроль вариаций напряженно-деформированного состояния и характеристик массива горных пород по результатам прецизионных наблюдений за уровнем подземных вод» и 19-05-00809 «Механизм деформирования флюидонасыщенного коллектора при сейсмическом воздействии по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод». Принимал участие в проекте РФФИ 14-17-00719 «Механика медленных перемещений по разломам и трещинам: условия возникновения и возможность трансформации. Следствия и значение для снижения сейсмической опасности», проекте РФФИ 17-05-01271 «Релаксация избыточных напряжений в областях структурных нарушений массивов горных пород».

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов обусловлена комплексным использованием геолого-геофизических и гидрогеологических методов и базируется на сопоставимости данных, полученных в процессе обработки синхронной регистрации сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров. Применение высокоточных аппаратно-измерительных комплексов направлено на дистанционный контроль реакции водонасыщенного коллектора на квазистационарные факторы (атмосферное давление, земные приливы) и периодические, вызванные прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов, производимых при эксплуатации железорудных месторождений КМА. Полученные экспериментальные данные в пределах природной (территория ГФО «Михнево») и природно-техногенных геосистем (на отдельных участках СИП и площадке разрабатываемых месторождений) с применением взаимодополняющих методик согласуются с теоретическими расчетами.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались:

- на международных конференциях, в т.ч. «Геофизическая конференция», Санкт-Петербург, 2000; «Геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды», Львов, 2011; «Мониторинг ядерных последствий», Курчатов, Казахстан, 2004, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018; «European Seismological Commission 33rd General Assembly «Seismology without boundaries», Moscow, 2012; «Finite-Elements Models, Modflow and More. Solving Groundwater Problems», Carlsbad, Czech Republic, 2004; «Uranium in the Environment. Mining Impact and Consequences», Freiberg, Germany, 2005, 2008; XI международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный», Екатеринбург, 2005; «International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM», Albena, Bulgaria, 2010, 2015 – 2019; «XXIII, XXV Международный симпозиум «Неделя горняка», Москва, 2015, 2017; «Annual Meeting», Anchorage, Alaska, USA, 2014; «Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology», Istanbul, Turkey, 2014; «18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tides. Intelligent Earth System Sensing, Scientific Enquiry and Discovery», Trieste, Italy, 2016; «Joint Scientific Assembly of IAG and IASPEI», Kobe, 2017; «Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии», 2017; «Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing

Technologies», Tomsk, 2018-2021; «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере», Москва, 2018; EGU General Assembly, on-line, 2020;

- на всероссийских совещаниях и конференциях, в т.ч. «Геодинамика и техногенез», Ярославль, 2000; «Комплексные проблемы гидрогеологии», Санкт-Петербург, 2013; «Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии», Москва, 2013; «Мониторинг и прогнозирование катастроф», Махачкала, 2016; «Научные аспекты экологических проблем России», Москва, 2001; «Проблемы сейсмоструктоники», Москва, 2011; «Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и Московской области», 2012; «Сергеевские чтения», Москва, 2013, 2015, 2016; «Триггерные эффекты в геосистемах», Москва, 2013, 2015, 2019; «Физические проблемы экологии», Москва, 2001, 2004, 2013; «Решение экологических и технологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья», Москва, 2019; «Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ», посвященное памяти профессора С.И. Шермана, Иркутск, 2021; «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов», Петропавловск-Камчатский, 2017, 2021.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 87 работ (без учета тезисов конференций), в том числе 26 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 18 публикаций, проиндексированных в международных базах научных знаний Scopus, Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и библиографии, включающей 248 наименований. Работа изложена на 262 листах, содержит 158 рисунков и 20 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность академику РАН Адушкину В.В., профессорам, докторам физико-математических наук Кочаряну Г.Г. и Спиваку А.А. за поддержку многолетних исследований по изучению реакции водонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие. Автор выражает глубокую признательность своим коллегам – кандидатам физико-математических наук Бесединой А.Н., Виноградову Е.А., Шпаковскому В.И., кандидатам технических наук – Кабыченко Н.В., Свинцову И.С., ведущим геофизикам - Шпаковской Р.С., Русиновой Л.А. за научное сотрудничество, обсуждение и ценные замечания. Автор также выражает признательность докторам физико-математических наук Овчинникову В.М., Родкину М.В., докторам геолого-минералогических наук Киссину И.Г., Копыловой Г.Н., кандидату физико-математических наук Барабанову В.Л. - за обсуждение работы в процессе ее подготовки, инженеру Годуновой Л.Д. - за техническую редакцию текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность и научная новизна темы, определяются цель и решаемые задачи, формулируются положения, выносимые на защиту, отмечается практическая значимость и подтверждается достоверность полученных результатов исследования. Предложенная академиком М.А. Садовским и развитая его последователями В.Н. Родионовым, В.Ф. Писаренко, И.А. Сизовым и др. концепция блочно-иерархического строения земной коры придала важный импульс решению многих задач геофизики, гидрогеологии и горного дела. Проблемы механического и сейсмического действия взрыва в блочной среде отражены в работах академика В.В. Адушкина, В.Н. Костюченко, Г.Г. Кочаряна, А.А. Спивака и др. Натурному и лабораторному исследованию закономерностей деформирования среды в очаговой области землетрясений посвящены работы А.В. Пономарева, Е.А. Рогожина, В.Б. Смирнова и др. Влияние сейсмических колебаний от удаленных землетрясений на динамику деформирования среды и эффекты накопления малых возмущений рассматривались в работах академика В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна, К.М. Мирзоева, С.Х. Негматулаева, чл.-корр. А.В. Николаева, академика М.А. Садовского, чл.-корр. Г.А. Соболева и др. Эффекты влияния вибраций на эффективную проницаемость среды и приемистость скважин исследовались в работах

Е.В. Виноградова, академика М.В. Курлени, В.Н. Николаевского, С.В. Сердюкова, Э.М. Симкина и др. В работах академика А.Д. Гвишиани, В.Н. Татарина, В.Н. Морозова развиваются новые подходы к обработке больших объемов геофизической информации и разрабатываются методы мониторинга устойчивости геологической среды на основе анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной изоляции радиоактивных отходов.

В области изучения гидрогеологических предвестников землетрясений наиболее известны работы И.С. Киссина, В.О. Волейшо, Д.Г. Осики, А.Н. Султанходжаева и др. Значительный вклад в разработку методики поиска гидрогеологических предвестников землетрясений принадлежит Г.Н. Копыловой. Процессы миграции подземных вод по разломным зонам рассматриваются в работах В.В. Ружича, К.Ж. Семинского, С.Н. Тагильцева. Гидрогеологическим аспектам цифрового мониторинга посвящены работы С.В. Алексеева, С.Г. Вахромеева и др. Модель гидрогеодеформационного поля, предложенная Г.С. Вартамяном, Г.В. Куликовым, развивается С.К. Стажило-Алексеевым, А.М. Лыгиным, И.Н. Кадуриным и др. в рамках государственного мониторинга недр РФ. Основы гидрогеодинамических расчетов в условиях естественного и техногенного режима подземных вод представлены в работах Б.В. Боровского, В.М. Максимова, В.А. Мироненко, чл.-корр. В.Г. Румынина, В.М. Шестакова. Методы статистического анализа непрерывных рядов прецизионных наблюдений за уровнем подземных вод в сейсмичном и асейсмичном регионах отражены в статьях и монографиях А.А. Любушина. Первые результаты обработки экспериментально полученных данных прецизионного мониторинга уровня подземных вод в платформенных условиях приведены в работах А.Л. Багмета, М.И. Багмета, В.Л. Барабанова, А.О. Гриневского, А.Б. Манукина, Е.И. Попова. Хорошо известны работы аналогичной направленности, выполненные зарубежными специалистами Н.Н. Cooper, P.A. Hsieh, S. Rojstaczer, E.E. Brodsky, E. Roeloffs, M. Manga, E. Shalev E., Z. Shi, X. Sun, C.-Y. Wang, L. Xue и др.

В главе 1 «Обзор опубликованных результатов исследований гидрогеологических откликов на динамические воздействия» приводится обобщение и анализ опубликованных данных по исследованию реакции водонасыщенного коллектора на квазистационарные источники (атмосферное давление, земные приливы) и периодические факторы, связанные с землетрясениями и крупномасштабными взрывами.

В разделе 1.1 рассматривается влияние атмосферного давления и земных приливов на состояние водонасыщенного коллектора. В платформенных условиях прецизионные наблюдения за вариациями уровня подземных вод выполнялись эпизодически. В результате обработки временных рядов уровня воды в скважине и атмосферного давления, полученных впервые сотрудниками ИФЗ РАН в 1986-1987 гг. в г. Обнинске, были определены коэффициенты барометрической и приливной эффективности системы «пласт-скважина», рассчитаны амплитуды и фазы основных типов приливных волн [Барабанов и др., 1988; Багмет и др., 1989, Любушин и др., 1993]. На основе высокоточного мониторинга уровня разновозрастных водоносных горизонтов в пос. Зеленый Ногинского района Московской области и на северо-западе Москвы предложена методика анализа приливных вариаций уровней подземных вод [Любушин и др., 1997]. Обработка непрерывных прецизионных рядов измерений атмосферного давления и уровня подземных вод, проводимых в скважине глубиной 400 м в Москве, направлена на исследование стационарности свойств гидрогеологических временных рядов продолжительностью более 22 лет в платформенных условиях [Любушин и др., 2019].

В сейсмоактивном регионе режимная сеть высокоточных гидрогеологических наблюдений для поиска предвестников землетрясений развернута Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизической службы РАН» с 1996 г. [Копылова, Болдина, 2019]. Разработанная система специализированных наблюдений за физико-химическими параметрами и уровнем подземных вод направлена на получение

количественных оценок величин пред- и косейсмической деформации водовмещающих пород [Копылова, Болдина, 2021; Kopylova, Boldina, 2021].

За рубежом выделяются несколько основных направлений исследований фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод [Hsieh et al., 1987; Rojstaczer, 1988; Ritzi et al., 1991; Furbish, 1991; Burbey, 2010]. Определение типа коллектора и степени защищенности водоносного горизонта выполняется на основе гармонического анализа по гидрогеологическому отклику на приливы и атмосферное давление [Rahi, Halihan, 2013; Hussein et al., 2013]. В сейсмоактивных регионах проводятся исследования по определению возможного влияния сейсмических волн на проницаемость водонасыщенного коллектора [Cooper et al., 1965; Brodsky et al., 2003]. Изменение значений фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в смещении грунта и уровне водоносного горизонта после прохождения сейсмических волн с максимальными амплитудами скорости смещения грунта 0.16-2.1 см от землетрясений с магнитудами (M) от 4.8 до 7.3 [Elkhoury et al., 2006], рядом зарубежных ученых [Xue et al., 2013, 2016] рассматривается в качестве основного критерия, подтверждающего необратимое изменение свойств коллектора.

В разделе **1.2** выполнена систематизация опубликованных данных по гидрогеологическим эффектам, вызванным землетрясениями. Впервые гидрогеологические эффекты с амплитудами от первых десятков сантиметров до 4.6 м были зарегистрированы от землетрясения, произошедшего 27 марта 1964 г. на Аляске M_w 8.4. Последующие многолетние наблюдения за реакцией подземных вод на землетрясения позволили выделить основные типы гидрогеологических эффектов: предвестники, косейсмические и постсейсмические изменения уровня [Киссин, 2015; Копылова, Болдина, 2020; Shi et al., 2015]. Косейсмические вариации уровня, связанные с моментом прохождения сейсмических волн, различаются по реакции на события – скачкообразные (step-like) и постепенные (gradual), по знаку – подъем или снижение и по наличию или отсутствию осцилляции уровня. Среди постсейсмических изменений уровня выделяются устойчивые с различной продолжительностью.

Согласно концепции, изложенной в работе [Wang, Manga, 2010], при регистрации гидрогеологических откликов на землетрясения к ближней зоне отнесены расстояния, сопоставимые с длиной разрыва L . Промежуточная зона определяется расстояниями в пределах 1-10 L , дальняя – на расстояниях свыше 10 L . В ближней и промежуточной зонах обычно проявляется эффект изменения поля статических напряжений, связанных с подвижкой в очаге. В дальних зонах регистрируются динамические, реже - остаточные вариации уровня подземных вод. В сейсмоактивных регионах необратимое деформирование водонасыщенного коллектора подтверждено продолжительным региональным снижением уровня подземных вод в зонах влияния региональных разломов с последующим его восстановлением [Xue et al., 2013; Liao et al., 2015]. В переходной зоне прослежены различные по продолжительности и интенсивности вариации уровней водоносных горизонтов, зависящие от локальных гидрогеологических условий [King et al., 1999; Shi et al., 2015]. В платформенных условиях преимущественно выделяются динамические вариации уровня подземных вод, которые описываются теорией пороупругости, в единичных случаях при катастрофических землетрясениях отмечены постсейсмические эффекты [Виноградов и др., 2011б].

В разделе **1.3** выполнено обобщение результатов исследований высокоинтенсивного техногенного воздействия на водонасыщенный коллектор. Первые сведения о подъеме уровня на 17 м относительно первоначального положения были получены через 40 дней после подземного ядерного взрыва (ПЯВ) Aardvark, Невада 12.05.1962 г. в наблюдательной скважине на расстоянии 307 м от эпицентра [Knox et al., 1965]. Формирование локальной депрессионной воронки в эпицентральной зоне подземного взрыва, проведенного 14.10.1965 г. в скважине 1003, установлено на площадке «Сары-Узень» СИП [Израэль и др., 1970; Гордеев и др., 2007].

Одно из первых обобщений реакции подземных вод при ПЯВ представлено в работах [Адушкин и др., 1992; 1993] в виде схематизации перераспределения подземного потока, связанного с формированием зон наведенной трещиноватости в эпицентральной зоне. Первый этап (I) - образование «купола» избыточного давления над эпицентром взрыва приводит к мгновенному подъему уровня подземных вод. Второй этап (II) - обусловлен заполнением зон техногенной трещиноватости и представлен снижением уровня поверхности в эпицентральной зоне. Третий этап (III) вызван постепенным восстановлением уровня до первоначального положения за счет привлечения дополнительных естественных ресурсов. Последствия взрывного воздействия на режим подземных вод прослежены на приведенных расстояниях ($r/q^{1/3}$) до 1000 м/кг^{1/3} (10 м/кг^{1/3}) и превосходят более чем на порядок радиус зоны наведенной при взрыве трещиноватости.

В открытой печати представлен анализ последствий проведения подземных ядерных взрывов – Cannikin и Milrow на острове Амчитка. Приведены результаты регистрации вариаций расходов в ручьях, расположенных на эпицентральных расстояниях от 1.5 до 11.2 км, уровня и давления с амплитудами от 207 до 1.7 бар в скважинах глубиной от 96.3 до 2134.2 м, удаленных от эпицентров ПЯВ на 1.2–22.7 км [Hassan et al., 2002].

В разделе 1.4 рассмотрены гидрогеологические отклики на локальные и региональные землетрясения, произошедшие в регионе водохранилищ Койна и Варна в западной Индии. С 1963 г. в этом регионе зарегистрировано более 100 событий $M \geq 4$ и 18 землетрясений $M \geq 5$ [Arora et al., 2017]. Для ряда локальных землетрясений с M 4.3-5.2 наряду со скачкообразным подъемом и снижением уровня подземных вод с амплитудами 2-8 см прослежено постепенное снижение уровня на 0.5-12 см на расстоянии от 1.8 до 24 км [Chadha et al., 2008a,b]. Восстановление уровня подземных вод до первоначального положения происходит в течение суток. Регион расположения водохранилищ Койна и Варна является одним из примеров триггерной сейсмичности, связанной с заполнением водохранилищ.

На основе обобщения и систематизации опубликованного материала в главе 1 показано, что данные синхронных измерений атмосферного давления, приливных деформаций и уровня подземных вод используются как для расчета эффективности воздействия внешних факторов на флюидодинамический режим, так и для оценки фильтрационных характеристик пласта. Показано, что влияние атмосферного давления и лунно-солнечных приливов в одних случаях рассматривается как помеха, в других - как полезный сигнал, который применяется для тестирования информативности пункта наблюдений.

В то же время при определении фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в смещении грунта и уровне подземных вод, недостаточно исследовано влияние периодических факторов разного типа на водонасыщенный коллектор, которые приводят к искажению приливного сигнала. В частности, при оценке изменений проницаемости коллектора до и после землетрясений по данным мониторинга фазового сдвига не учитываются фоновые вариации этого параметра, которые могут быть обусловлены годовой цикличностью приливного сигнала. Подобный подход приводит к некорректной оценке фильтрационных свойств.

В многочисленных публикациях представлены результаты регистрации косейсмических и постсейсмических гидрогеологических эффектов, зарегистрированные на разных эпицентральных расстояниях от землетрясений в пределах одного региона. Вместе с тем сравнительный анализ реакции водонасыщенных коллекторов, приуроченных к различным гидрогеологическим структурам, на одно и то же событие не проводится. При исследовании вариаций уровня подземных вод, вызванных высокоинтенсивным воздействием на пласт, не учитывается продолжительность дестабилизации гидрогеодинамической обстановки, которая является одним из критериев необратимого деформирования водонасыщенного коллектора.

В главе 2 «Методика исследования реакции водонасыщенного коллектора на квазистатические и периодические факторы» предложен поэтапный подход к обработке экспериментально полученного материала.

В разделе 2.1 представлен комплекс полевых геолого-геофизических и гидрогеологических исследований, который проводился с участием автора на отдельных участках СИП до и после подземных ядерных взрывов (ПЯВ). По результатам геоморфологической съемки и данным профильного нивелирования были составлены карты-планы нарушений дневной поверхности ряда участков площадки «Балапан». Для сравнения значений скоростей смещения грунта (U , м/с) при различных ПЯВ использовалось эмпирическое соотношение:

$$U = \frac{A}{(\bar{R})^n}, \quad (1)$$

где A – параметр, зависящий от свойств породы, \bar{R} – приведенное расстояние, учитывающее мощность взрыва и эпицентральное расстояние, м/кт^{1/3}, которые изменяются в следующих диапазонах $A=300-400$, $n = 1.6-2.0$ [Механическое, 2003].

Для изучения скоростного разреза и прослеживания глубины залегания преломляющих границ использовался метод преломленных волн. Определялась глубина преломляющей границы между выветрелыми, интенсивно трещиноватыми и относительно монолитными скальными породами до и после взрыва и соответствующие значения скоростей.

Для регистрации реакции подземных вод на взрывное воздействие осуществлялись специальные гидрогеологические работы при 29 взрывах, проведенных в равнинной местности на площадке «Балапан», и при 15 взрывах, выполненных в условиях низкогогорья в пределах площадки «Дегелен». Точность регистрации вариаций уровня стандартными методами составляла ± 1 см [Святовец и др., 2008]. Поэтому выделить и проследить динамические вариации уровня при ПЯВ не представлялось возможным.

Результаты комплексных исследований использовались для составления схематических инженерно-геологических и гидрогеологических карт участков и разрезов, анализа последствий изменения состояния дневной поверхности, оценки эффективных характеристик водонасыщенного коллектора и гидрогеодинамической обстановки после высокоинтенсивного воздействия.

В разделе 2.2 представлена методика обработки данных прецизионного мониторинга уровня подземных вод. Для характеристики барометрического отклика уровня оценивается величина барометрической эффективности E_b , которая определяется как:

$$E_b = -\Delta h_b / \Delta b, \quad (2)$$

где Δh_b – амплитуда отклика уровня, см; Δb – изменение барометрической нагрузки, гПа.

Величина приливной чувствительности уровня воды A_v (приливной фактор) по отношению к теоретической или экспериментально зарегистрированной приливной деформации водовмещающих пород рассчитывается как:

$$A_v = -\Delta h_i / \Delta \varepsilon, \quad (3)$$

где Δh_i – амплитуда приливного отклика, мм; $\Delta \varepsilon$ – амплитуда приливных изменений объемной деформации, 10^{-9} , и зависит от фильтрационных параметров водоносного горизонта и конструкции скважины [Копылова и др., 2009].

Для сопоставления между собой гидрогеологических эффектов, прослеженных от удаленных землетрясений, рассчитывались:

– максимальная массовая скорость смещения грунта (U_m , см/с) [Кочарян и др., 2011a]:

$$U_m = 0.0012 \frac{10^M}{R^{1.5}}, \quad (4)$$

где R – эпицентральный расстояние, км для землетрясений с $M > 4$;

– плотность сейсмической энергии (ε , Дж/м³), которая может быть определена через M_w и эпицентральный расстояние (r) из следующего соотношения [Wang, 2007]:

$$M_w = 2.7 + 0.69 \lg \varepsilon + 2.1 \lg r, \quad (5)$$

– амплитудный фактор (χ , мм/(мм/с)) [Brodsky et al., 2003]:

$$\chi = A_{\max} / V_{\max}, \quad (6)$$

который представляет собой отношение спектральных амплитуд уровня A_{\max} , мм к скорости смещения грунта V_{\max} , мм/с.

Прецизионный мониторинг уровня подземных вод на территории ГФО «Михнево» проводится в скважинах № 2 и № 3, пробуренных на глубину 115 и 60 м, соответственно, в декабре 2006 г. и марте 2013 г. Скважины оборудованы прецизионными погружными датчиками гидростатического давления LMP308i (рис. 1а). Точность регистрации вариаций уровня с частотой 1 Гц составляет $\pm 0.1\%$ диапазона измерений (ДИ). Наблюдения за атмосферным давлением до июля 2019 г. выполнялись цифровой метеостанцией, с августа 2020 г. – с использованием датчика Keller PAA-33X. Сейсмическая регистрация ведется малоапертурной группой «Михнево», укомплектованной широкополосными сейсмометрами STS-2 и CM-3-E с частотой опроса 100 Гц, установленными в шахте на глубине 20 м [Адушкин и др., 2013а,б; 2016; Санина и др., 2019]. Для сравнения с результатами гидрогеологических измерений сейсмические данные предварительно децимировались в 100 раз.

В пределах промышленного региона (район г. Губкин Белгородской области) в двух пунктах наблюдений в состав аппаратурно-измерительного комплекса входят погружные датчики гидростатического давления Keller PR-36XW, датчик атмосферного давления Keller PAA-33X, сейсмометры СПВ-3К и 6-ти канальные регистраторы REFTEK-130 и Centaur CTR4-6S. Частота опроса составляет 200 Гц/канал. Точность регистрации вариаций уровня (давления) в системе «пласт-скважина» $\pm 0.1\%$ ДИ. Датчики уровня установлены в трех скважинах на глубине 3 м ниже уровня воды (рис. 1б). Сейсмометры расположены на глубине ~ 0.5 –1 м на бетонном постаменте. Датчик атмосферного давления и регистраторы находятся на поверхности в специально оборудованных металлических контейнерах. Расстояние между двумя пунктами наблюдений составляет 1.6 км [Горбунова и др., 2021а].

Результаты синхронных прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории ГФО «Михнево» и вблизи г. Губкин Белгородской области, метео- и сейсмическими параметрами сведены в единую базу данных, которая постоянно обновляется.

Для выделения приливных компонент в гидрогеологических рядах выполнена децимация для приведения данных к временному шагу 300 с, проведена очистка сигнала от влияния атмосферного давления и фильтрация в диапазонах 22-26 часов и 11-13 часов. Приливы в смещении грунта по вертикальной компоненте рассчитаны с использованием программного пакета ETERNA 3.0 применительно к координатам ГФО «Михнево» (54°57.6' с.ш. 37° 45.9' в.д.) и г. Губкин (51° 16.9' с.ш. 37° 35.2) [Wenzel, 1994]. Спектральный анализ исходных рядов наблюдений за уровнем подземных вод, смещением грунта и атмосферным давлением позволил выделить основные типы приливных волн. В вариациях уровня напорного водоносного горизонта наиболее стабильной является полусуточная волна M_2 лунного типа [Беседина и др., 2015].

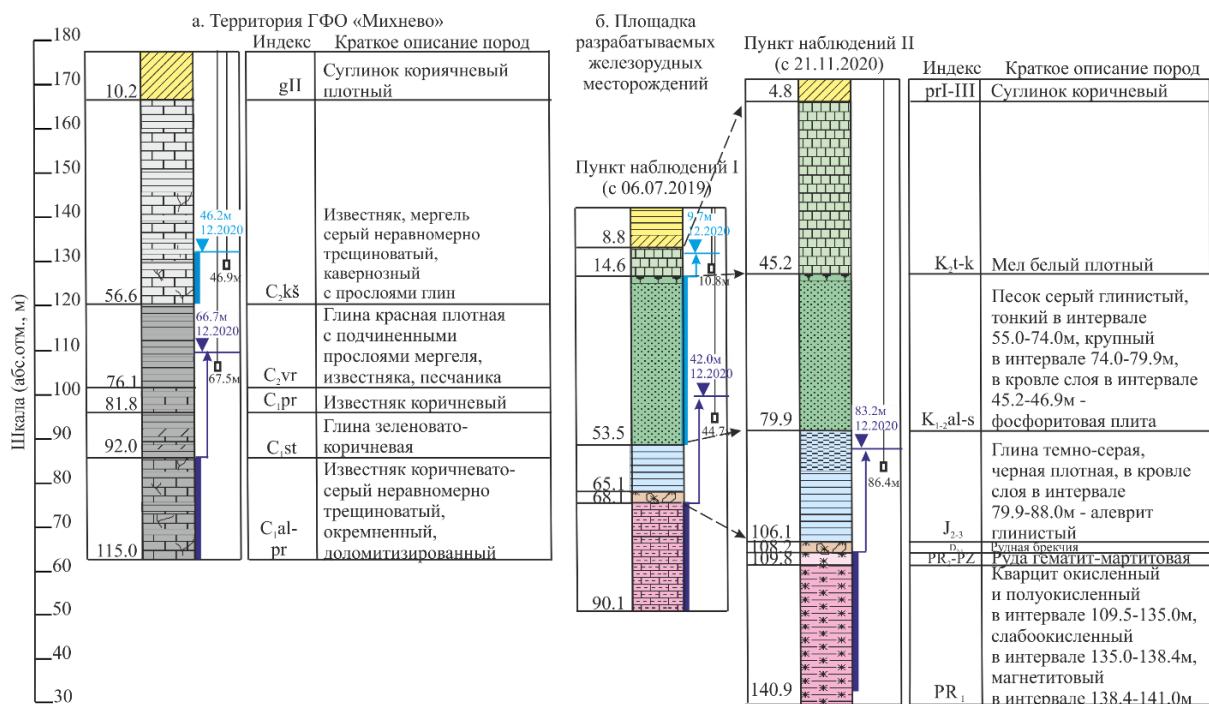


Рисунок 1 - Геологические разрезы наблюдательных скважин на территории ГФО «Михнево» (а) и в пределах разрабатываемых железорудных месторождений (б) (слева – глубина залегания подошвы слоя, м; справа – положение уровня и датчика, м)

Для оценки фазового сдвига между приливной компонентой M_2 , выделенной в уровне напорного водоносного горизонта и смещении грунта, применен метод, основанный на построении фазовых траекторий в координатах «смещение грунта – изменение уровня воды» в виде эллипсов [Кабыченко, 2008]. Полученные значения фазового сдвига использованы для расчета водопроводимости пород в рамках пороупругой модели [Hsieh et al., 1987].

В вариациях уровня верхнего слабонапорного водоносного горизонта на фоне регионального тренда снижения уровня подземных вод отмечено эпизодическое формирование мини депрессионных воронок из-за локального водоотбора подземных вод из технической скважины, удаленной на расстояние 300 м от наблюдательной. Для предварительной оценки водопроводимости трещинно-порового коллектора графоаналитическим способом были отобраны 69 воронок, зарегистрированные с августа 2013 г. по январь 2016 г. при разной мощности обводненных пород. Суть метода заключается в построении графика временного прослеживания восстановления уровня после прекращения работы насоса в технической скважине на фоне квазистационарного режима фильтрации.

Для анализа реакции подземных вод на территории ГФО «Михнево» на удаленные землетрясения на сейсмограммах скорости смещения грунта по вертикальной компоненте и в вариациях уровня напорного и слабонапорного горизонтов определялись максимальные значения амплитуд в группах поверхностных волн, измеренные между последовательным максимумом и минимумом. Для типизации гидрогеологических откликов от землетрясений данные регистрации уровня и скорости смещения грунта рассмотрены в высоко- и низкочастотном диапазонах с периодами менее и более 60 с для 6 часовых интервалов.

По сейсмическим и гидрогеологическим данным за 3 часа до прихода волны на станцию и через 3 часа после рассчитывалось отношение модулей спектров скорости смещения грунта и колебаний уровня воды с целью удаления влияния локальных особенностей расположения станции. При последующем делении спектра уровня воды на спектр скорости грунта на определенных ранее частотах, соответствующих синхронизации пиковых значений, определялся коэффициент усиления – амплитудный фактор, который

является параметром отклика уровня воды в скважине на прохождение сейсмических волн от землетрясений [Brodsky et al., 2003].

Методический подход к обработке результатов прецизионного гидрогеологического мониторинга, проводимого на территории ГФО «Михнево», применен к данным, полученным в техногенно-нарушенных условиях вблизи г. Губкин, предварительно отфильтрованным фильтром верхних частот с частотой 0.0025 Гц. Максимальные амплитуды вариаций уровня подземных вод и скорости смещения грунта при взрывах измерены между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 0.4 с с перекрытием 50%. При массовых взрывах в шахте подрывались от 1 до 4 камер с интервалом от 26 с до 1 мин 20 с на глубине от 250 до 300 м от поверхности. При проведении массовых взрывов в карьере подрывались от 1 до 8 блоков. Продолжительность отклика при взрывах в шахте не превышает 1–3 с, при взрывах в карьере - увеличивается до 5–7 с. Из сформированной базы данных регистрации взрывов выбраны интервалы 40-секундной регистрации сейсмических и гидрогеологических сигналов. Продолжительность интервалов составляет 15 с до взрыва и 25 с после взрыва.

Для анализа реакции водонасыщенного коллектора на массовые взрывы рассчитаны и построены амплитудные и нормированные спектры по трем компонентам скорости смещения грунта и вариациям уровня разновозрастных водоносных горизонтов, вызванным прохождением сейсмических волн от каждого взрыва. Для сопоставления данных по реакции системы «пласт-скважина» на разные массовые взрывы использовалось приведенное расстояние (эпицентральное расстояние, нормированное на корень кубический из массы взрывчатого вещества (ВВ) в ступени замедления).

Оценка верхнего предела сводной зависимости магнитуды ($M(Y)_{max}$) от мощности взрыва (Y) проведена по соотношению [Khalturin et al., 1998] в виде:

$$M(Y)_{max} = 2.45 + 0.73 \cdot \lg Y (\text{тонн}). \quad (7)$$

Основные выводы по главе 2.

1. Предложена методика анализа экспериментальных данных для формирования сводной информационной базы данных регистрации реакции подземных вод на высокоинтенсивное воздействие.

2. Разработан поэтапный методический подход к обработке высокоточных гидрогеологических рядов, полученных на территории ГФО «Михнево» (природная геосистема) и в промышленном регионе (природно-техногенная геосистема), который позволяет исследовать гидрогеологические эффекты на основе анализа фоновых изменений значений фазового сдвига между приливной волной M_2 , выделенной в вариациях уровня напорного водоносного горизонта и смещении грунта, определенном экспериментально и теоретически; а также изучения реакции системы «пласт-скважина» на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов, производимых при разработке железорудных месторождений КМА.

В главе 3 «Геолого-структурные и гидрогеологические условия площадок исследований» приведены характеристики природно-техногенных геосистем – площадок «Балапан», «Дегелен» СИП, Коробковского и Лебединского железорудных месторождений (раздел 3.1) и природной геосистемы – территории ГФО «Михнево» (раздел 3.2).

В разделах 3.1.1 и 3.1.2 отражены условия формирования природно-техногенной геосистемы под влиянием проведения ПЯВ в скважинах на площадке «Балапан» и штольнях – горизонтальных горных выработок площадки «Дегелен». В геологическом разрезе рассматриваемых площадок развиты два структурных этажа – палеозойский и кайнозойский. На уровне палеозойского фундамента площадки «Балапан» распространены преимущественно терригенные, вулканогенно-осадочные и метаморфизованные образования карбона, на юго-западе – породы среднего кембрия, осложненные батолитами, прорванные пластовыми интрузиями и дайками верхнего палеозоя. Мезозойский структурный этаж имеет ограниченное распространение. Центральная часть площадки «Дегелен» сложена интрузивными образованиями верхнего палеозоя, периферия –

эффузивными и эффузивно-осадочными отложениями нижнего карбона, пронизанными редкими жилами и дайками порфиритов и аплитов. Кайнозойский структурный этаж представлен осадочными песчано-глинистыми отложениями, выполняющими неровности палеозойского фундамента, залегающими практически горизонтально, мощностью от первых метров до 80 м.

Породы фундамента подвержены метаморфизму, дислоцированы, смяты в линейные складки, подчиненные генеральному северо-западному простиранию. По степени и характеру трещиноватости в разрезе выделены зоны экзогенной трещиноватости и относительно монолитных пород, тектонически ослабленные участки [Горбунова, 2007]. В пределах площадки «Балапан» прослежен целый ряд разломов различных порядков и крупных трещин, ограничивающих блоки соответствующих рангов. Основное направление дизъюнктивов северо-западное, совпадающее с простиранием пород. В южной части установлен региональный Калба-Чингизский разлом, который состоит из серии чешуйчатых надвигов с крутым юго-западным наклоном плоскости сместителя [Кочарян и др., 2011б]. Морфоструктурный анализ горного массива Дегелен позволил проследить последовательность заложения основных направлений разрывных нарушений [Иванченко, Горбунова, 2015].

Подземные воды трещинно-пластового и трещинно-жильного типа приурочены, соответственно, к зонам экзогенного выветривания и тектонической трещиноватости пород палеозойского фундамента. Грунтовые воды получают спорадическое развитие в рыхлой толще мезо-кайнозойских образований. Подземные воды площадки «Балапан» вскрыты на глубине от 2.1 до 70 м. Пьезометрические уровни изменяются от 2 до 26.8 м, создавая напор до 60-66 м. Движение подземных вод происходит преимущественно в северо-восточном направлении со средним уклоном до 0.001-0.003. В пределах блоков водопроницаемость пород изменяется от 0.01 до 1 м²/сут, проницаемость – от 3·10⁻¹⁵ до 6·10⁻¹⁴ м². Наиболее обводненной является зона экзогенной трещиноватости скальных пород мощностью от 10 до 40 м. Коэффициент фильтрации составляет 0.01 – 1.04 м/сут, в зоне тектонической трещиноватости - увеличивается до 7.4 м/сут и более. Режим подземных вод преимущественно равнинный, естественные колебания уровней не превышают 3-5 см/сут.

Гидрогеологические условия площадки «Дегелен» обусловлены сильной расчлененностью рельефа. Наиболее возвышенная часть массива до уровня проходки горных выработок сдренирована и служит областью питания подземных вод. Трещинно-пластовые воды преимущественно развиты вдоль выположенных склонов массива в зоне экзогенного выветривания пород. Трещинно-жильные воды приурочены к зонам влияния разломов субширотного и северо-западного простирания, наиболее обводненным за счет частичного перехвата поверхностного и подземного стоков с водоразделов. Порово-пластовые воды спорадически распространены в рыхлых отложениях в долинах ручьев.

В режиме подземных вод выделены два типа – равнинный и предгорный. Скорость подземного потока изменяется от первых см/сут в зоне экзогенного выветривания до первых десятков см/сут вблизи дизъюнктивов. Сезонные водопроявления в кровле и стенках штолен обусловлены инфильтрацией атмосферных осадков и талых вод по зонам разрывных нарушений, литологическим контактам, участкам наведенной трещиноватости, имеющим непосредственную связь с поверхностью. Постоянные водопроявления в виде струйного высачивания различной интенсивности в горных выработках указывают на вскрытие гидрогеологически активных разломов.

В разделе **3.1.3** представлено описание сложных техногенно-нарушенных гидрогеологических условий, сформированных в пределах Коробковского и Лебединского железорудных месторождений КМА, разрабатываемых подземным и открытым способами, соответственно. Над шахтным полем преимущественное распространение получает надрудный водоносный комплекс, состоящий из двух горизонтов, разделенных региональным водоупором – юрскими глинами. Верхний напорный горизонт порового типа развит в песках альб-сеномана мела. Нижний горизонт - трещинно-пластовые воды

приурочены к зоне экзогенного выветривания архей-протерозойских пород, представленными железными рудами, окисленными кварцитами, сланцами (рис. 1б). Нижним водоупором служат неокисленные плотные породы рудно-кристаллического массива.

Верхний водоносный горизонт по периметру дренажного контуру Лебединского карьера полностью сдренирован. Снижение уровня нижнего водоносного горизонта в бортах карьеров достигает 60 и более м. За длительный период эксплуатации Коробковского месторождения в пределах неравномерно обводненного шахтного поля распространены локальные депрессионные воронки, сформированные в результате работы водопонижительных систем в окрестностях шахтных стволов и разрабатываемых рудных залежей. Режим подземных вод в пределах площадки техногенно-нарушенный и проявляется в виде плавного подъема уровня в весенний период. Амплитуды сезонных вариаций уровня в 2020-2021 гг. по верхнему (альб-сеноманскому) водоносному горизонту составили 1.6 м, по нижнему (архей-протерозойскому) – 1.2 м.

В разделе 3.2 основное внимание уделено анализу гидрогеологической ситуации ГФО «Михнево» – природной геосистеме, которая находится вне зоны активного техногенеза [Адушкин и др., 2013а, 2014]. Наличие регионального водоупора – верейских глин среднего карбона предопределяет разобщенность уровней верхнего каширского слабонапорного водоносного горизонта и нижнего – алексинско-протвинского напорного горизонта, залегающих на глубине 46.2 и 66.7 м, соответственно (рис. 1а). Водовмещающими породами являются неравномерно трещиноватые известняки с подчиненными прослоями доломитов, мергелей и глин. По результатам гидрогеологического опробования водопроницаемость верхнего горизонта составляет 15 м²/сут, нижезалегающего – не превышает 4 м²/сут. Режим верхнего горизонта техногенно-нарушенный из-за повсеместной эксплуатации подземных вод скважинами, колодцами и характеризуется региональным трендом снижения уровня поверхности. Режим нижезалегающего горизонта естественный. Амплитуды сезонных вариаций в паводковый период достигают 3 м [Виноградов и др., 2011а]. Скорости изменения уровня подземных вод варьируют в пределах ±5 см/сут. В периоды сезонного питания водоносного горизонта превышают 10 см/сут.

Основные выводы по главе 3.

1. В пределах площадок «Балапан» и «Дегелен» преимущественно распространены подземные воды трещинно-пластового и трещинно-жильного типов. Скорость подземного потока изменяется от первых см/сут в зоне экзогенного выветривания до первых десятков см/сут вблизи дизъюнктивов. По данным стационарных пунктов наблюдений, оборудованных у выходов родников, порталов горных выработок и в скважинах режим подземных вод в саях и ущельях массива Дегелен – преимущественно предгорного типа, на выположенных склонах мелкосопочника и в долине площадки «Балапан» – близок к равнинному типу.

2. Сложные гидрогеологические условия железорудных месторождений КМА обусловлены литолого-стратиграфической неоднородностью разреза, наличием разрывных нарушений, участков повышенной трещиноватости пород, сопряженных с проходкой горных выработок и отработкой рудных залежей. Изменение гидрогеодинамической обстановки зависит как от процесса разработки железорудных месторождений, так и от комплекса выполняемых дренажных мероприятий.

3. К природной геосистеме отнесена территория геофизической ГФО «Михнево» с слабоизмененным природным ландшафтом. В верхней части гидрогеологического разреза в интервале абсолютных отметок 120-130 м преобладает радиальный тип подземного стока по направлению от водоразделов к эрозионной сети, который присущ каширскому водоносному горизонту и частично соответствует современному рельефу местности. В нижней части разреза в интервале абсолютных отметок 90-110 м прослежен латеральный

тип подземного стока, который определяет режим алексинско-протвинского водоносного горизонта.

4. Природно-техногенные и природная геосистемы характеризуются значительной неоднородностью эффективных характеристик (физико-механических и фильтрационных параметров) по площади и в разрезе, наличием областей сдренированных пород и гидрогеологических «окон» - участков эрозионного размыва водоупорных горизонтов. На территории площадок «Дегелен» и «Балапан», в пределах шахтного поля Коробковского месторождения и Лебединского карьера отмечена гидравлическая взаимосвязь между трещинно-пластовыми и трещинно-жильными водами, на территории ГФО «Михнево» – прослежена взаимосвязь между режимами нижнего алексинско-протвинского водоносного горизонта и поверхностным водотоком – рекой Окой.

5. Рассматриваемые водоносные горизонты, приуроченные к водонасыщенным коллекторам, представленным песчаными отложениями альб-сеномана нижнего и среднего мела, сланцами и кварцитами архей-протерозоя в пределах разрабатываемых железорудных месторождений КМА, известняками неравномерно трещиноватыми среднего и нижнего карбона на территории ГФО «Михнево», характеризуются относительно невысокими значениями коэффициента фильтрации, упругой водоотдачи и являются информативными для постановки и проведения прецизионного гидрогеологического мониторинга.

В главе 4 «Последствия крупномасштабного техногенного воздействия на массив горных пород» предложен научно-методический подход к выделению зон необратимого и квазиобратимого деформирования на основе обработки экспериментальных данных, полученных на площадках «Дегелен» и «Балапан» СИП.

В разделе 4.1 выполнен анализ последствий техногенного воздействия на горный массив Дегелен. Установлено, что проведение ПЯВ в штольнях в период с 1962 г. по 1989 г., в целом, способствовало «старению» местности, выраженному в разрушении скальных выступов, гребней, обрывов и образованию глыбово-щебенистых осыпей у подножий крутых склонов. Над концевыми боксами штолен прослежены поствзрывные деформации дневной поверхности в виде воронок проседаний, серий разноориентированных зияющих трещин. По результатам повторных гидрогеологических обследований, выполненных с участием автора, отмечено уменьшение числа родников, смещение истоков ручьев с сокращением их протяженности, частично связанное с вскрытием горными выработками трещинно-жильных вод на более низких гипсометрических уровнях [Горбунова, 2012].

По данным сейсмопросвечивания и сейсмопрофилирования, проведенным в штольнях и на поверхности, выделены основные области необратимого деформирования массива горных пород, которые характеризуются интервалами изменений скорости распространения продольных волн. В эпицентральной зоне – зоне дробления и интенсивной трещиноватости установлено уменьшение скорости распространения продольных волн. В зоне блоковой трещиноватости, возможно, как уменьшение, так и увеличение скорости распространения продольных волн. В зоне выветривания зарегистрировано уменьшение скорости распространения продольных волн из-за возникновения новых трещин и подновления существующих. С увеличением трещиноватости и трещинной пустотности связано изменение проницаемости массива. Необратимые изменения массива и разрывных нарушений, установленные по результатам геолого-геофизических работ и гидрогеологического обследования штолен, подтверждены на поверхности данными мониторинга уровня подземных вод в скважинах и водопритока на портале штолен.

В разделе 4.2 проведено детальное исследование структурно-нарушенных зон, сформированных при ПЯВ на отдельных участках площадки «Балапан», в том числе и в южной части – «Заречье» (рис. 2). По результатам геоморфологического обследования в пределах участков проведения ПЯВ выделены техногенные микроформы рельефа и зоны, различающиеся по степени выраженности поствзрывных деформаций [Горбунова, 2018a].

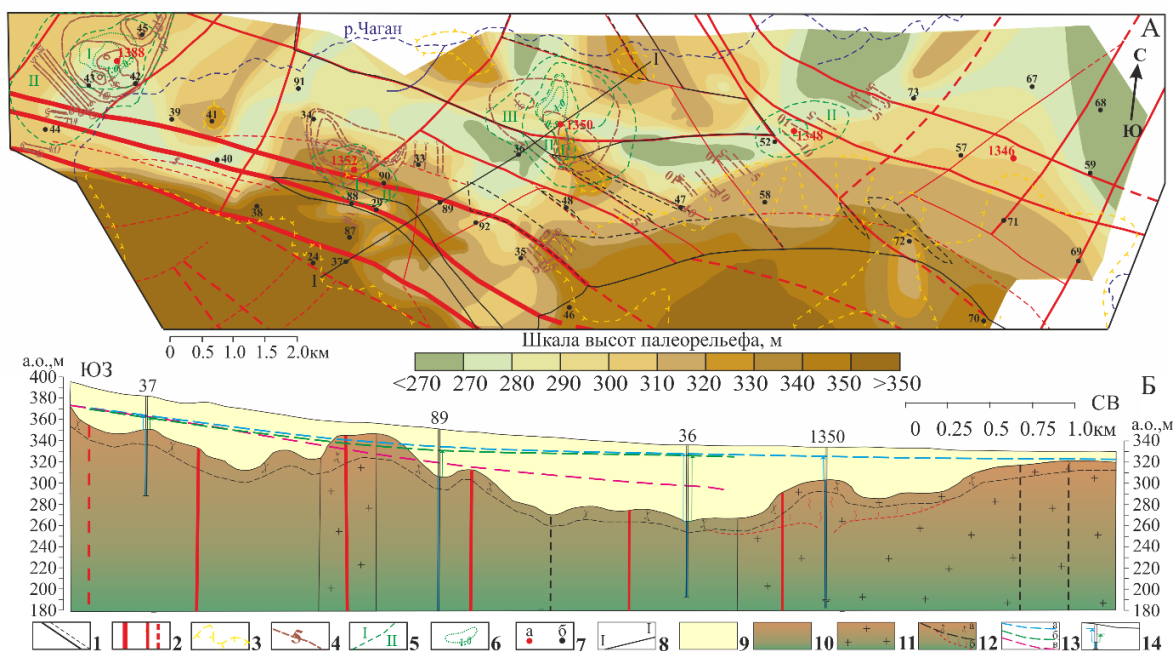


Рисунок 2 – Схема палеорельефа площадки «Заречье» (А) и разрез по линии I-I (Б) (1-8 – на карте: 1 – геологическая граница (пунктир – граница малых интрузий); 2 – разломы разного ранга; 3 – граница распространения глин неогена, бергштрихи направлены в сторону распространения отложений; 4 – изолинии изменения глубины залегания структурной границы между выветрелыми и относительно монолитными породами, м; 5 – граница между участками с разной степенью измененности дневной поверхности: I – интенсивно деформированная, II – локально деформированная, III – слабodeформированная; 6 – изолинии изменения высоты дневной поверхности по данным нивелирования, м; 7 – скважина и ее номер: а – боевая, б – наблюдательная; 8 – линия разреза; 9-14 – на разрезе: 9-11 – отложения: 9 – мезо-кайнозой, 10 – палеозой, 11 – интрузивные образования; 12 – граница зоны экзогенной (а) и техногенной (б) трещиноватости пород; 13 – уровень подземных вод по состоянию: а – 11.03.1987 г., б – 06.1989 г., в – максимального снижения; 14 – скважина)

Максимальный подъем грунта до 3.1 м прослежен при взрыве в боевой скважине, пройденной в гранитном массиве. Значительные амплитуды смещения грунта до 2.2 м зарегистрированы при проведении взрывов в туфах и туфопесчаниках по сравнению с поствзрывными деформациями, отмеченными при проведении взрывов в песчаниках с прослоями сланцев углистых. Поствзрывные деформации дневной поверхности не выявлены с использованием стандартных методов топогеодезического нивелирования при невысоких значениях магнитуд взрывов 5.3-5.7 и низких значениях скорости распространения продольных волн на уровне гипоцентра взрыва 4.6-4.9 км/с [Ан и др., 2014].

В результате комплексных геолого-геофизических работ, выполненных до и после ПЯВ по профилям и в скважинах, установлено изменение значений продольных и пластовых скоростей. Наибольшие изменения положения структурной границы раздела выветрелых и относительно монолитных пород до 10 и более метров наряду с эпицентральной зоной отмечены вдоль склона погребенного водораздела и приурочены к зонам влияния разломов СЗ простирания.

Максимальные изменения гидрогеодинамической обстановки зарегистрированы при ПЯВ в скважине 1388. В ближней зоне отмечено фонтанирование скважин на протяжении первых 5 часов и последующее снижение уровня подземных вод со скоростью от первых метров до первых десятков метров.

Подобная реакция подземных вод указывает на необратимое изменение фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора на эпицентральной расстоянии 0.5-

0.6 км и в осевой части регионального разлома, трассируемой дайкой гранодиоритов, которое подтверждено результатами гидрогеологического опробования. Водопроницаемость пород в скважине 29 увеличилась в 3 раза до 6.5 м²/сут, скважине 44 – в 2 раза при уменьшении значений пластовых скоростей в 1.5 раза [Горбунова, Спивак, 1997]. Направление подземного потока в створе скважин 34-33-36 с северо-восточного изменилось на западное к эпицентру ПЯВ. В створе скважин 35-36 за трехлетний период наблюдений после ПЯВ в скважинах 1348, 1388, 1350, 1346, 1352 разрыв уровней увеличился от 5.5 до 6.5 м (рис. 3).

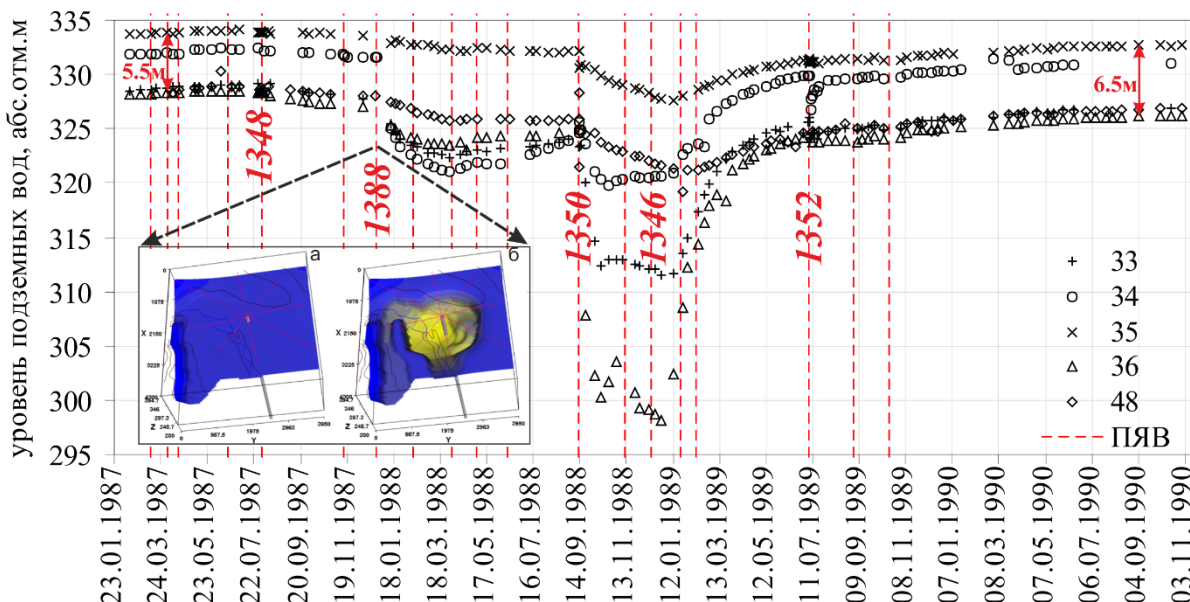


Рисунок 3 – Вариации уровня подземных вод на территории площадки «Заречье» (на вставке – пьезометрическая поверхность до взрыва (а) и через день после ПЯВ 1388 (б), рассчитанная с использованием пакета MODFLOW)

Формирование депрессионной воронки в эпицентральной зоне ПЯВ в скважине 1388 свидетельствует о наличии гидравлической связи с зонами наведенной трещиноватости ПЯВ (вставка на рис. 3). Через 3 месяца после ПЯВ на эпицентральной дистанции 0.6-1.5 км юго-западнее эпицентра и в зоне регионального разлома отмечено осушение кровли коренных пород из-за сработки гидростатического напора. В остальных скважинах, расположенных на расстоянии от 3.2 до 7.5 км, установлено плавное снижение уровня в течение 3 месяцев после ПЯВ в скважине 1388 (рис. 3). Вблизи области питания снижение уровня не превысило 0.2-0.4 м (скважины 24, 37). Исключение составила эпицентральной зона ранее проведенного ПЯВ в скважине 1348, в пределах которой в скважине 52 прослежено восстановление уровня на 9.5 м (рис. 2, 4). Таким образом, на схеме изменения уровня подземных вод через 3 месяца после ПЯВ в скважине 1388 выделены 2 участка (рис. 4).

В восточной части установлено постепенное восстановление уровня после ПЯВ в скважине 1348. В западной части прослежено максимальное дренирование массива после ПЯВ в скважине 1388. Разрывное нарушение СЗ простирания в центре площадки «Заречье», к которому приурочена малая интрузия порфиристов верхнего палеозоя, выступает в качестве гидрогеологически активной границы, контролирующей режимы снижения и восстановления уровня подземных вод.

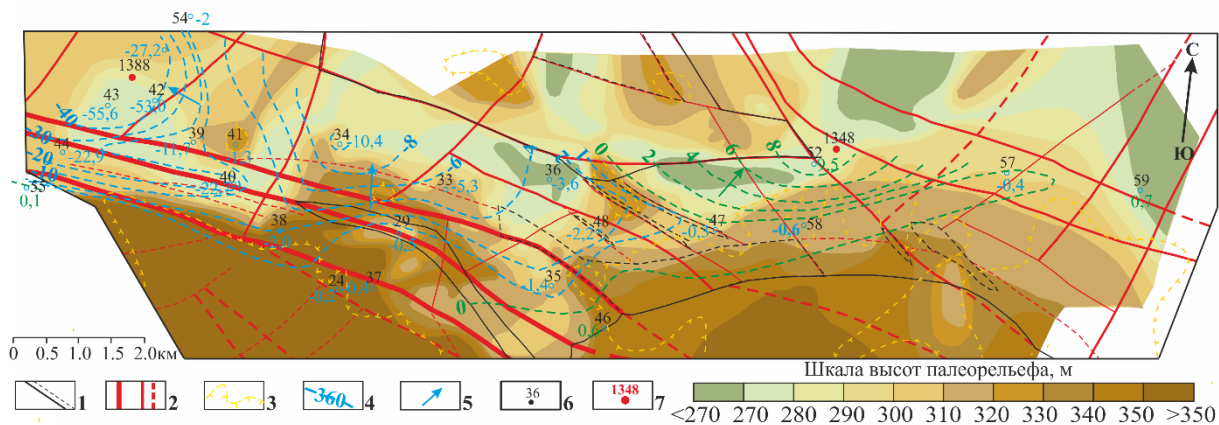


Рисунок 4 – Схема изменения уровня подземных вод после ПЯВ в скважине 1388 за период с 25.12.1987 г. по 31.03.1988 г. (1 – геологическая граница интрузивных образований (пунктир – граница малых интрузий); 2 – разрывные нарушения разного ранга; 3 – граница распространения глин неогена, бергштрихи направлены в сторону развития отложений; 4 – изолинии амплитуд максимального снижения уровня (голубой) и восстановления (зеленый); 5 – основное направление движения подземных вод; 6-7 – скважина и ее номер: 6 – наблюдательная, цифра внизу – амплитуда максимального снижения уровня, м; 7 – боевая)

Основные выводы по главе 4.

1. Изменение физико-механических и фильтрационных параметров пород, а также образование техногенных микроформ рельефа подтверждает необратимое деформирование водонасыщенного коллектора. Поствзрывные деформации массива горных пород сопряжены с эпицентральной зоной ПЯВ, приурочены к структурным границам разного типа – разрывным нарушениям, литолого-стратиграфическим контактам, участкам, осложненным ранее проведенными ПЯВ, и прослежены в плане и разрезе скважин за счет сдвижения интервалов водопритоков и изменения их интенсивности.

2. Техногенное перераспределение направлений подземного потока и уклонов в пределах горного массива «Дегелен» связано с дренированием разрывных нарушений сериями штолен, пройденных в нижней части гор. Размеры области нарушения гидрогеодинамической обстановки на площадке «Балапан» зависят не только от параметров взрыва, но и от геолого-структурных и гидрогеологических условий участка. Разрывные нарушения выступают в качестве границ, контролирующих области формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод.

3. Вариации основных параметров подземного потока – изменение водопритоков в горных выработках и уровня в наблюдательных скважинах, уклонов, скорости, превышающие фоновые (сезонные) вариации этих значений на порядок, являются одним из индикаторов изменения свойств массива горных пород, позволяющим оценить степень взаимосвязи распространенных водоносных горизонтов с центральной зоной ПЯВ. Размеры сформированной при взрывном воздействии дополнительной гидрогеологической емкости (техногенной трещиноватости) определяют параметры и время существования воронки депрессии.

В главе 5 «Влияние квазистационарных и периодических факторов на водонасыщенный коллектор» представлены результаты исследований гидрогеологических эффектов, прослеженных на территории ГФО «Михнево» и в пределах разрабатываемых железорудных месторождений КМА, по данным прецизионного мониторинга.

В разделах 5.1.1 и 5.2.1 выполнен анализ гидрогеологического отклика на земные приливы. В амплитудных спектрах, построенных по гидрогеологическим и сейсмическим рядам, выделены основные типы приливных волн – суточные (K_1 , O_1) и полусуточные (S_2 , M_2) [Беседина и др., 2015; Горбунова и др., 2021б]. Полученные данные использованы для

оценки приливного фактора на основе отношения амплитуд основных типов приливных волн, выделенных в вариациях уровня подземных вод и теоретически рассчитанной объемной деформации. Для водонасыщенных коллекторов, представленных неравномерно трещиноватыми известняками на территории ГФО «Михнево», значения приливного фактора в слабонапорных условиях в среднем составляют $0.34 \text{ мм}/10^{-9}$, в напорных – $0.8 \text{ мм}/10^{-9}$. В пределах разрабатываемых железорудных месторождений амплитудный фактор водонасыщенного коллектора, сложенного песками глинистыми (верхний горизонт), составляет $0.27 \text{ мм}/10^{-9}$, для нижнего горизонта, распространенного в сланцах, - не превышает $0.42 \text{ мм}/10^{-9}$, в кварцитах - увеличивается до $0.9 \text{ мм}/10^{-9}$.

Предварительное применение визуализации огибающих суточных и полусуточных приливов способствует идентификации участков, характеризующихся осложнением форм приливных компонент в уровне воды по сравнению с теоретически рассчитанным смещением грунта (рис. 5). Подобное нарушение формы и амплитуды приливных компонент в уровне подземных вод зависит от скорости изменения уровня. В периоды интенсивного подъема и снижения уровня напорного горизонта прослежено искажение амплитуд приливных волн. Суточные приливы в уровне слабонапорного горизонта осложнены эпизодическим водоотбором из технической скважины [Свинцов и др., 2015].

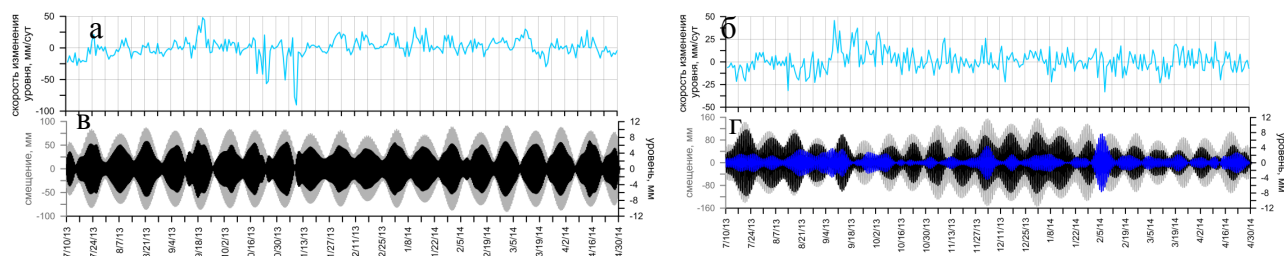


Рисунок 5 – Диаграммы скорости изменения уровня в напорном (а) и слабонапорном (б) водоносных горизонтах (голубая линия), полусуточных (в) и суточных (г) приливов в смещении грунта по вертикальной компоненте (серая линия), в уровне напорного (черная линия) и слабонапорного (синяя линия) водоносного горизонта на территории ГФО «Михнево»

В соответствии с теорией пороупругости запаздывание приливных волн в уровне подземных вод относительно смещения грунта использовано для оценки водопроводимости водонасыщенного коллектора в условиях квазистационарной фильтрации. С учетом зависимости между водопроводимостью пласта и фазовым сдвигом между приливными волнами, выделенными в смещении грунта и уровне подземных вод, предложенной в работе [Hsieh et al., 1987], проницаемость карбонатного коллектора на территории ГФО «Михнево» изменяется от $8.2 \cdot 10^{-14}$ до $15.4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$. В пределах разрабатываемых железорудных месторождений КМА проницаемость коллектора, представленного песком глинистым и кварцитом, составляет соответственно $(0.6-1.1) \cdot 10^{-14}$ и $(0.1-1.4) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$.

В разделе 5.1.2 исследована реакция водонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений. За период наблюдений 2010-2019 гг. в напорном водоносном горизонте зарегистрированы гидрогеологические отклики на 16 землетрясений M_w 7.1-9.1, произошедших на эпицентральных расстояниях от 1864 до 14862 км. В слабонапорном водоносном горизонте за период наблюдений 2013-2019 гг. гидрогеологические эффекты выделены от 59 землетрясений M_w 6.2-8.3 на эпицентральных расстояниях от 1863 до 16507 км.

Максимальные значения амплитуд скорости смещения грунта 3.8 мм/с и уровня напорного горизонта 41.5 мм установлены при землетрясении M_w 9.1 Тохоку, произошедшем 11.03.2011 г. у восточного побережья острова Хонсю, Япония. В слабонапорных условиях – наибольшие значения вариаций скорости 2.5 мм/с и уровня 118 мм зарегистрированы при землетрясении 08.09.2017 г. M_w 8.2 у западного побережья

Чьяпас, Мексика. Зависимость динамических колебаний уровня подземных вод от скорости смещения грунта аппроксимируется степенной функцией. Зависимость для слабонапорного водоносного горизонта характеризуется более высоким коэффициентом корреляции по сравнению с напорным.

На основе сравнительного анализа данных в диапазонах периодов до 60 с и более установлены 3 типа гидрогеологических эффектов, связанных с прохождением сейсмических волн [Горбунова и др., 2018а; 2021б]. Первый тип представлен вариациями уровня, которые ограниченно выделяются на фоне шума преимущественно в низкочастотной области (в напорном водоносном горизонте) или в высокочастотной области (в слабонапорном водоносном горизонте). Ко второму типу отнесены динамические вариации уровня, проявляющиеся в широком диапазоне частот. Первый и второй типы соответствуют косейсмическим вариациям уровня и синхронны смещению грунта, вызванному прохождением сейсмических волн. Третий тип, устойчиво выраженный в виде плавного постсейсмического подъема уровня в низкочастотном диапазоне наряду с косейсмическими вариациями уровня, отмечен при скорости смещения грунта более 1.5 мм/с. На нормированных спектрах скорости смещения грунта и уровня для I и II типов гидрогеологических эффектов установлено преимущественно совпадение экстремумов скорости смещения грунта и амплитуд уровня водоносного горизонта, для III типа - отчетливо выражены изменения в распределении экстремумов уровня воды относительно экстремумов скорости смещения грунта по частоте и интенсивности (рис. 6).

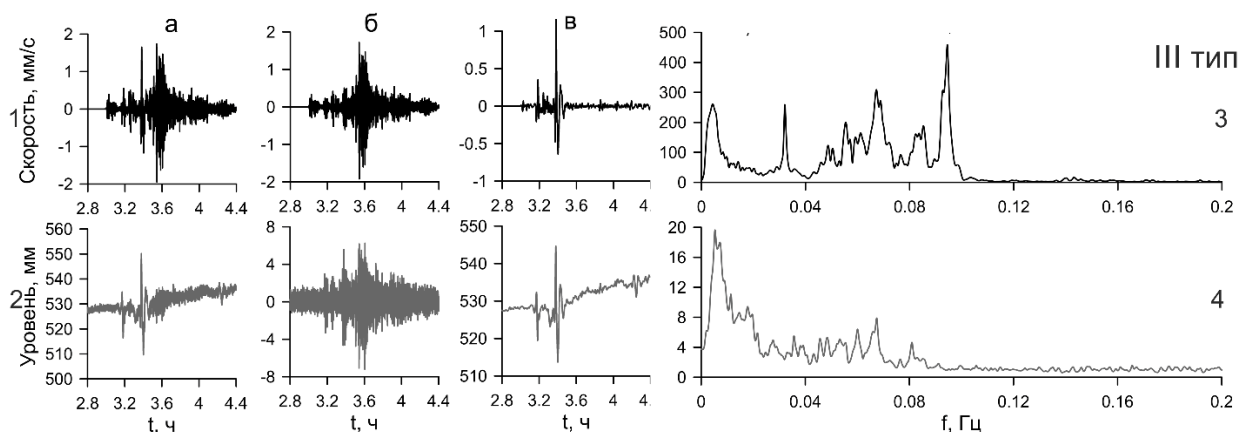


Рисунок 6 – Сейсмограммы (1), диаграммы уровня напорного водоносного горизонта (2), нормированные спектры скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (3) и уровня (4) при землетрясении Тохоку, Японии 11.03.2011 г. M_w 9.1 (а – исходные данные, б – в диапазоне периодов < 60 с, в – в диапазоне периодов > 60 с)

В разделе 5.1.3 исследован техногенно нарушенный режим слабонапорного водоносного горизонта, связанный с региональным водоотбором и эпизодической работой технической скважины, расположенной на расстоянии 0.3 км от наблюдательной. На прецизионной записи уровня на фоне тренда снижения выделены мини воронки, подобные депрессионным воронкам, которые формируются при эксплуатации водоносного горизонта. В процессе обработки графиков временного прослеживания восстановления уровня, связанного с техногенной помехой, выполнена оценка водопроводимости и проницаемости карбонатного коллектора в разрезе. Полученные средние значения изменения проницаемости по глубине составляют $(2.6-3.3) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ при общем тренде снижении уровня с 42.7 до 46.4 м.

В разделе 5.2.2 исследована реакция системы «пласт-скважина» на проведение массовых взрывов 2019-2020 гг. при разработке железорудных месторождений КМА. Амплитуды давления нижнего горизонта, приуроченного к коллектору трещинно-пластового типа, на порядок выше значений, прослеженных в верхнем горизонте, распространенном в пределах коллектора порового типа, при максимальной скорости

смещения грунта от 0.6 до 4 мм/с при взрывах в шахте КМА-руда и от 2 до 6 мм/с при взрывах на карьере Лебединского ГОК (рис. 7а).

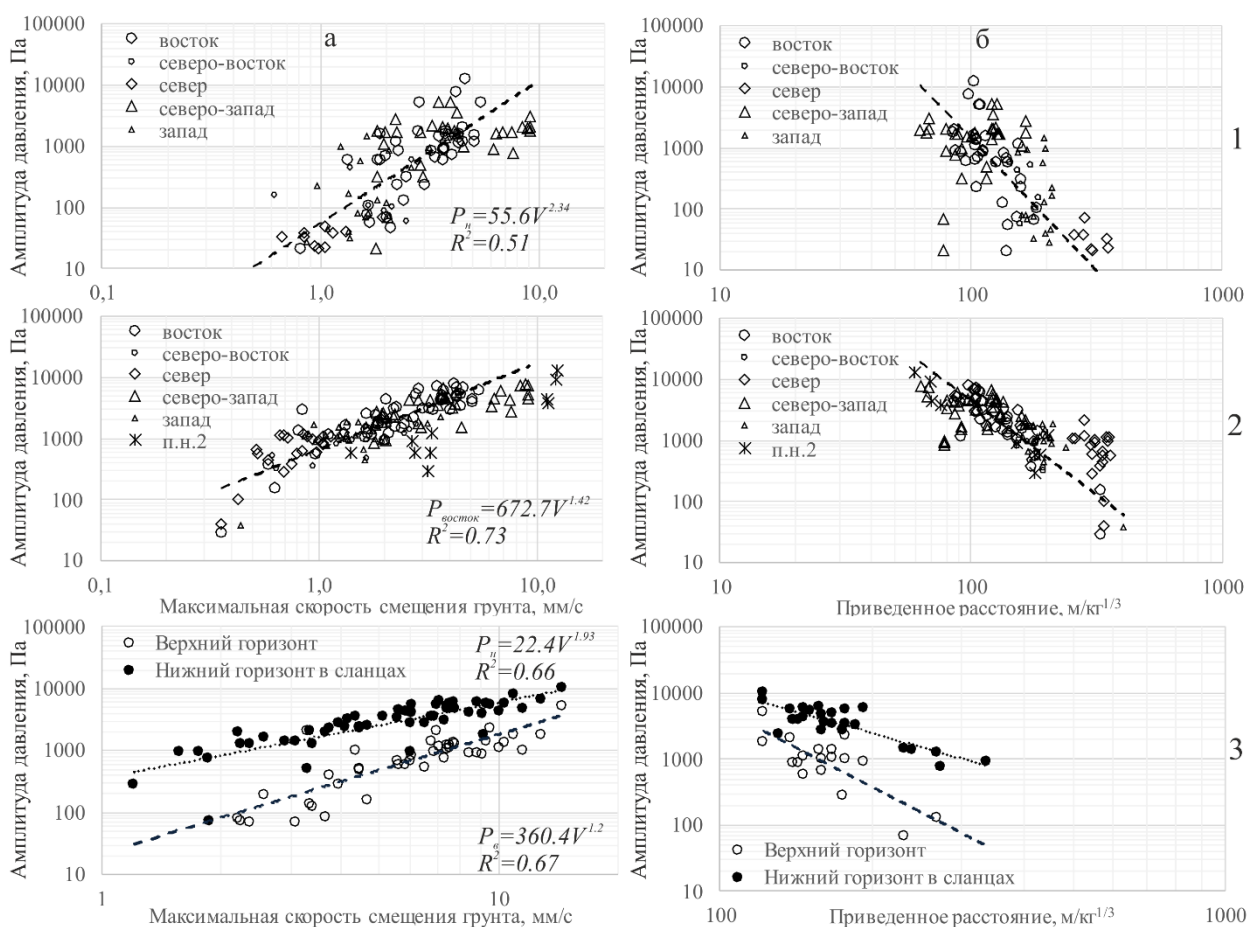


Рисунок 7 – Зависимость изменения давления воды в системе «пласт-скважина» от массовой скорости смещения грунта (а) и приведенного расстояния (б) в верхнем (1) и нижнем (2) горизонтах при взрывах в шахте и карьере (3) по пункту I, данные по регистрации в пункте II обозначены крестиками

В нижнем горизонте зарегистрированы отклики на все взрывы, произведенные в шахте, с амплитудами давления от 40 Па до 7.3 кПа в пункте наблюдений I (13 кПа в пункте наблюдений II) на приведенных расстояниях от 404 до 68 м/кг^{1/3} (60 м/кг^{1/3}) (рис. 7б). В верхнем горизонте вариации давления в системе «пласт-скважина» при взрывах в шахте в пункте наблюдений I изменяются от 23 Па до 12.2 кПа на приведенных расстояниях от 351 м/кг^{1/3} до 104 м/кг^{1/3}.

По результатам предварительной обработки экспериментальных данных установлено, что реакция датчиков, установленных в скважинах, опережает вступление сейсмометра, расположенного на поверхности, на 0.02-0.05 с при проведении взрывов [Батухтин и др., 2020; Беседина и др., 2019]. Максимумы амплитудных спектров гидрогеологических откликов нижнего горизонта на взрывы находятся преимущественно в диапазоне частот 28-32 и 48-52 Гц, верхнего – регистрируются в диапазоне 50-75 Гц. При увеличении эпицентрального расстояния между взрывной камерой и пунктом наблюдений отмечается смещение экстремумов спектров скорости смещения грунта и вариаций давления в системе «пласт-скважина» (рис. 8).

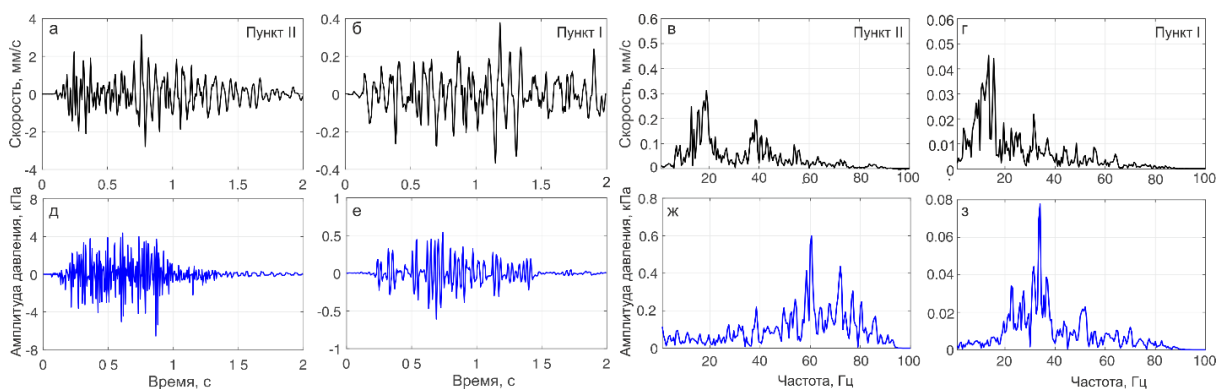


Рисунок 8 – Сейсмограммы (а, б), диаграммы давления (д, е), спектры скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (в,з) и давления (ж,з) в пунктах наблюдений I и II при одновременном подрыве двух камер 19.12.2020 г.

Основные выводы к главе 5.

В результате высокоточного гидрогеологического, барометрического и сейсмического мониторинга, проводимого в условиях природной геосистемы – ГФО «Михнево» и в пределах природно-техногенной геосистемы – зоне влияния разрабатываемых железорудных месторождений КМА:

- выделены основные типы приливных волн в вариациях уровня карбонатного и надрудного массивов и рассчитанном смещении грунта, определены амплитуды приливных волн и приливной фактор;

- рассчитаны фоновые фильтрационные характеристики водонасыщенных коллекторов надрудного комплекса – водопроницаемость и проницаемость на основе анализа фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в смещении грунта по вертикальной компоненте и уровне подземных вод;

- определены амплитуды гидрогеологических откликов и скоростей сейсмических волн от удаленных землетрясений на территории ГФО «Михнево» и массовых взрывов, производимых при разработке железорудных месторождений;

- установлена степенная зависимость зарегистрированной амплитуды вариаций давления в системе «пласт-скважина» от максимальной скорости смещения грунта удаленных землетрясений и массовых взрывов;

- отмечено различие амплитудно-частотных параметров откликов водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-пластового типов на сейсмическое воздействие.

В условиях природной геосистемы по реакции слабонапорного водоносного горизонта на локальную техногенную помеху на фоне регионального тренда снижения уровня прослежена фильтрационная неоднородность водонасыщенного коллектора. В пределах природно-техногенной геосистемы установлены различия в реакции систем «пласт-скважина», приуроченных к водонасыщенным коллекторам, представленных песками глинистыми, сланцем и кварцитом, на проведение массовых взрывов.

Наряду с исследованием гидрогеологических эффектов, зарегистрированных от таких факторов, как удаленные землетрясения и массовые взрывы, необходимо отметить, что при анализе фоновых параметров водонасыщенных коллекторов целесообразно проводить предварительную визуализацию огибающих приливов, выделенных в уровне и смещении грунта. Выделенные интервалы «искажения» приливных колебаний в уровне воды следует исключать из рассмотрения при оценке фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов. В платформенных условиях установлена эффективность использования прецизионного мониторинга уровня подземных вод в качестве «невозмущающего» способа оценки фильтрационных параметров и проницаемости водонасыщенного коллектора.

В главе 6 «Основные закономерности деформирования водонасыщенного коллектора» в качестве основных индикаторов изменения структуры порово-трещинного пространства и порового давления рассматриваются гидрогеологические эффекты, зарегистрированные в условиях природно-техногенной и природной геосистем.

В разделе 6.1 проведен анализ изменений гидрогеодинамической обстановки после ПЯВ для определения границ зон, характеризующихся различными режимами деформирования водонасыщенного коллектора. Значения максимальных снижений уровня подземных вод, зарегистрированные на площадке «Заречье» через разные интервалы времени от 1 до 45 дней после пяти ПЯВ, группируются в две области, которые могут быть охарактеризованы степенными зависимостями I и II, показанными на рисунке 9а.

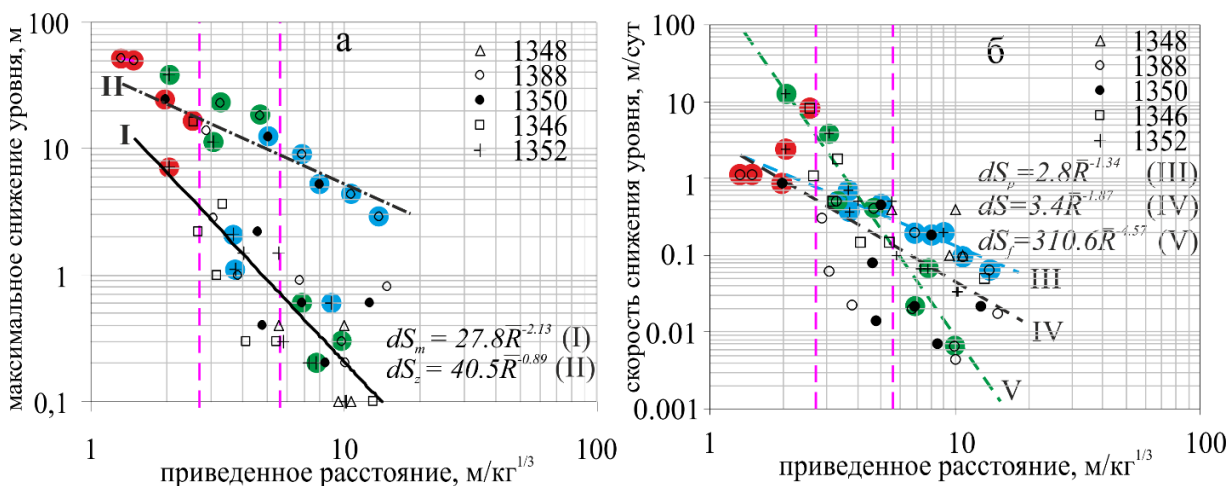


Рисунок 9 – Зависимость между амплитудой (а) и скоростью (б) максимального снижения уровня после ПЯВ в скважинах 1348 через 1 день, 1388 – 45 дней, 1350 – 28 дней, 1346 – 2 дня, 1352 – 3 дня от приведенного расстояния. Данные в эпицентре ПЯВ подсвечены красными кружками, вдоль осевой зоны разлома – зелеными, в пределах днища палеодолины – синими. Красным пунктиром обозначены границы зон необратимого и квазиобратимого деформирования массива

Максимальное снижение уровня до 51 м отмечено в эпицентральной зоне в пределах второй области на приведенном расстоянии до 2.7 м/кг^{1/3} через 45 дней после ПЯВ в скважине 1388 и до 38 м – в зоне влияния регионального разлома через 3 дня после ПЯВ в скважине 1352. На приведенном расстоянии до 5.6 м/кг^{1/3} установлено наибольшее снижение пьезометрической поверхности вдоль днища палеодолины до 12 м (рис. 4), сопоставимое со значениями, зарегистрированными в осевых зонах разлома от 11 до 23 м. Подобное соотношение свидетельствует об изменении основных параметров подземного потока – направлении и скорости движения вдоль палеодолины, которое прослежено и на расстоянии свыше 5.6 м/кг^{1/3}.

Анализ скорости максимального снижения уровня подземных вод подтверждает неоднозначное изменение гидрогеодинамической обстановки во вмещающем массиве горных пород, вдоль палеодолины и зоны регионального разлома, которое представлено степенными зависимостями III-V на рисунке 8б и обусловлено различными типами деформирования водовмещающего коллектора при ПЯВ. Наиболее высокие значения скорости снижения уровня от 12.7 до 0.4 м/сут установлены вдоль осевой зоны регионального разлома на приведенном расстоянии до 5.6 м/кг^{1/3}. На приведенных расстояниях свыше 5.6 м/кг^{1/3} наиболее высокие значения скорости снижения уровня зарегистрированы вдоль днища палеодолины. Подобное соотношение указывает на ведущую роль гидрогеодинамических процессов на рассматриваемых расстояниях.

На приведенных расстояниях до 2.7 м/кг^{1/3} от ПЯВ в скважинах 1348, 1388, 1350 и 1352 и частично в интервале приведенных расстояний от 2.7 до 5.6 м/кг^{1/3} отмечено

снижение глубины залегания структурной границы между выветрелыми, интенсивно трещиноватыми и относительно монолитными породами на 5 и более метров (рис. 2). В скважинах, расположенных в пределах рассматриваемых интервалов приведенных расстояний, значения пластовых скоростей в зоне экзогенного выветривания, преимущественно уменьшились на 9-58 %, водопроницаемость водовмещающих пород возросла в 1.1-2.0 раза. Таким образом, приведенное расстояние до $2.7 \text{ м/кг}^{1/3}$ от ПЯВ может быть принято за внешнюю границу зоны необратимого деформирования массива горных пород.

Изменения уровня подземных вод, установленные на приведенных расстояниях более $5.6 \text{ м/кг}^{1/3}$, соотнесены с динамическим деформированием водовмещающей толщи. Прослеженный региональный тренд снижения уровня подземных вод (рис. 3), выраженный в изменении направления подземного потока (рис. 4), связан с постепенным заполнением зон наведенной трещиноватости, сформированных при высокоинтенсивном воздействии в эпицентральной зоне и частично в зоне влияния регионального разлома.

В разделе **6.2** выполнен анализ динамического деформирования водонасыщенного коллектора при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений на территории ГФО «Михнево», а также при массовых взрывах в промышленном регионе, производимых при разработке железорудных месторождений КМА. Для гидрогеологических откликов, зарегистрированных на территории ГФО «Михнево», определен амплитудный фактор, рассчитанный как отношение спектральных амплитуд колебаний уровня воды к скорости смещения грунта по формуле (6). Значения амплитудного фактора напорного горизонта от землетрясений, произошедших на эпицентральных расстояниях 1864-3563 км в пределах Средиземноморско-Трансзиатского сейсмического пояса, уменьшается от 28 до 8 мм/(мм/с) в диапазоне периодов 15-20 с. Для землетрясений на эпицентральных расстояниях 6492-14464 км, приуроченных к Восточно- и Западно-Тихоокеанскому поясам, значение амплитудного фактора варьирует от 3 до 7 мм/(мм/с) в интервале периодов 13-43 с. Значения амплитудных факторов от землетрясений Тохоку 11.03.2011 г. и вблизи побережья Суматра 11.04.2012 г. совпадают в диапазоне периодов 25.4-25.8 с и 34.5-34.6 с, что, вероятно, свидетельствует об однотипной динамике деформирования водонасыщенного коллектора.

Амплитудный фактор слабонапорного горизонта для землетрясений, произошедших на эпицентральных расстояниях от 1975 до 4901 км, изменяется от 22 до 65 мм/(мм/с) для периодов 10-24 с, на эпицентральных расстояниях от 6517 до 15085 км – варьирует от 30-38 до 46 мм/(мм/с) для периодов 10-38 с. Более низкие значения амплитудного фактора напорного горизонта по сравнению с слабонапорным могут быть обусловлены различием фильтрационных характеристик.

Амплитудно-частотные параметры массовых взрывов рассмотрены при фильтрации сейсмических и гидрогеологических данных в диапазонах 1-10 и 1-100 Гц. В диапазоне частот 1-10 Гц отмечена синхронизация экстремумов скорости смещения грунта и вариаций давлений в системе «пласт-скважина» на амплитудных и нормированных спектрах. В диапазоне частот 10-100 Гц максимумы скорости смещения грунта и давления в системе «пласт-скважина» различаются.

Экспериментальные данные мониторинга, проводимого на территории ГФО «Михнево» и в зоне разработки железорудных месторождений КМА, рассматриваются совместно и использованы для оценки относительной деформации водонасыщенного коллектора при периодическом воздействии удаленных землетрясений и массовых взрывов, соответственно. Средние значения физико-механических параметров исследуемых коллекторов (плотность – ρ , скорость продольных волн в массиве – C , модуль Юнга – E), диапазоны вариаций массовых скоростей (V_m) и относительной деформации (e) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры водонасыщенных коллекторов [Геологический..., 1985; Терминологический..., 2011]

Водовмещающие породы	ρ , кг/м ³	C, м/с	E, ГПа	V_m , мм/с		$e \cdot 10^{-7}$		Примечание
				min	max	min	max	
известняк	~2680	~4700	~80	0.08	3.78	0.12	5.95	ГФО «Михнево»
сланец	~2800	~4800	~90	0.30	14.40	0.44	21.50	промышленный регион КМА

Полученные значения относительной деформации коллектора при сейсмическом воздействии на два порядка превышают фоновые параметры смещения грунта по вертикальной компоненте, рассчитанные для основных типов приливных волн на территории ГФО «Михнево» и в промышленном регионе КМА, которые составляют $(0.4-7.5) \cdot 10^{-9}$. Максимальные значения относительной деформации коллекторов, рассчитанные для массовых взрывов, превышают параметры, зарегистрированные при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений, и сопоставимы с результатами измерений, выполненных в горных выработках на глубине ~300 м (рис. 10б) [Беседина и др., 2020].

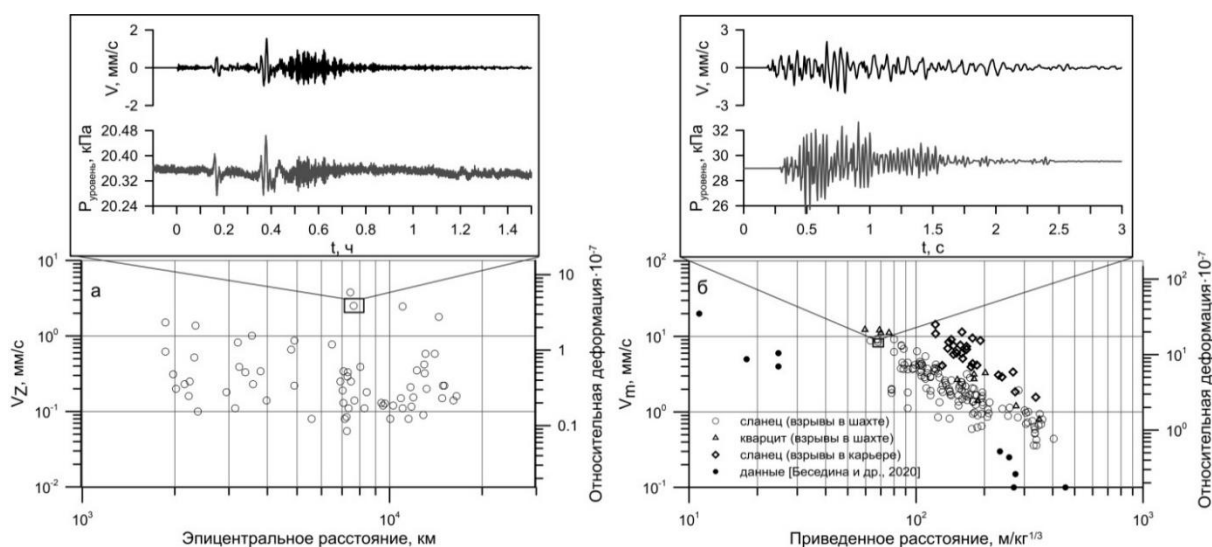


Рисунок 10 – Зависимость максимальной массовой скорости и максимальной деформации водонасыщенного коллектора трещинно-порового типа от эпицентрального расстояния удаленных землетрясений, зарегистрированных на территории ГФО «Михнево» (а), и от приведенного расстояния массовых взрывов, проведенных при разработке железорудных месторождений в шахте и на карьере (б) (на диаграмме на вставках показаны примеры постсейсмических гидрогеологических эффектов, выделенных при прохождении сейсмических волн от землетрясения 11.04.2012 M_w 8.6 вблизи Северной Суматры и взрыва 18.04.2020 г. в шахте с удельной массой ВВ в ступени 1.9 т; на диаграмме (б) залитыми кружками обозначены данные измерений, выполненные в шахте [Беседина и др., 2020])

Постсейсмические эффекты, отмеченные для 4-х землетрясений в виде подъема уровня, соответствуют относительной деформации водонасыщенного коллектора в пределах $(3-7) \cdot 10^{-7}$ (врезка на рис. 10а). Постсейсмическое увеличение давления в системе «пласт-скважина» на 554 Па при относительной деформации коллектора, приуроченного к сланцам, $1.4 \cdot 10^{-6}$ прослежено при взрыве в шахте на минимальном приведенном расстоянии 68 м/кг^{1/3} (врезка на рис. 10б).

В разделе 6.3 представлена феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия крупномасштабных и массовых взрывов и землетрясений, состоящая из трех частей (рис. 11).

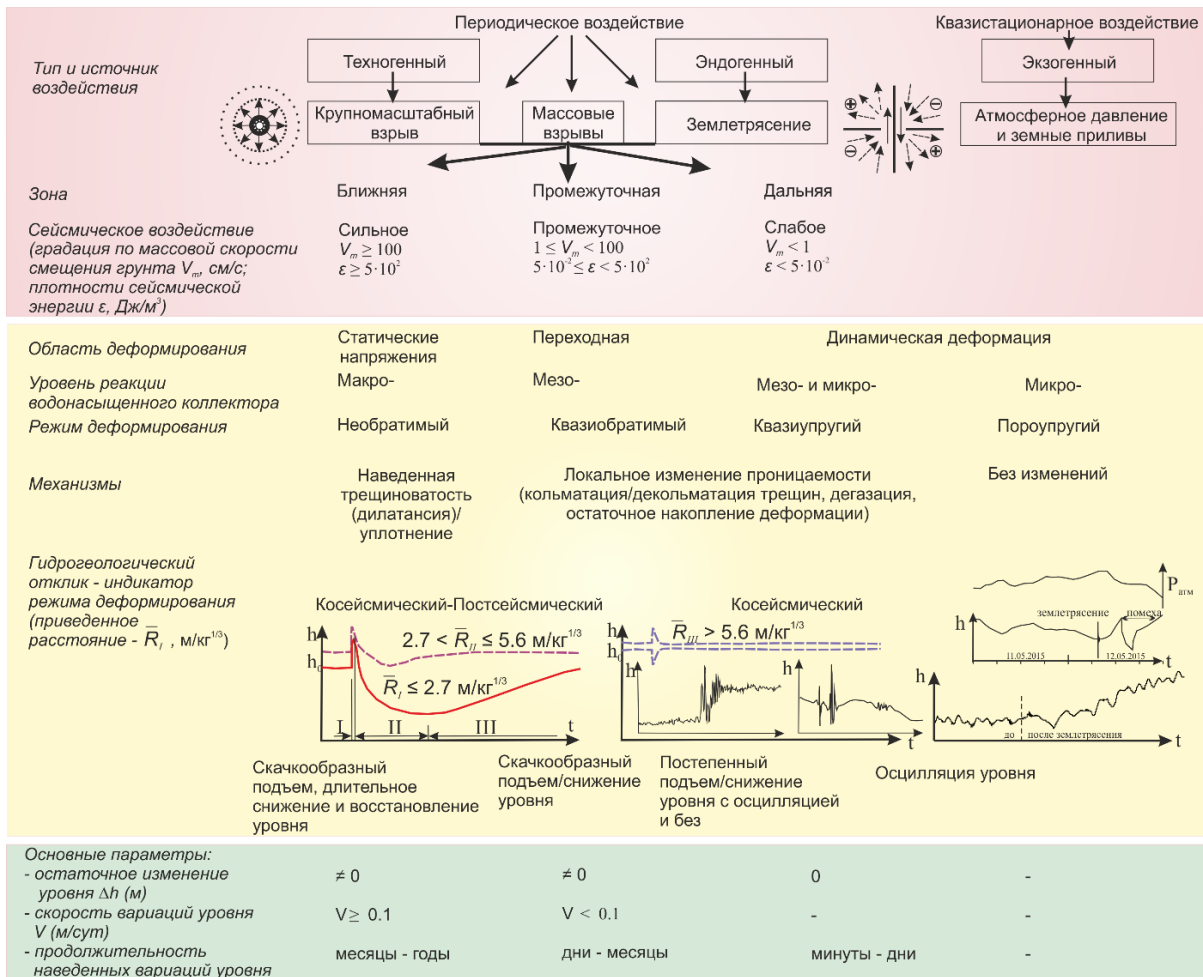


Рисунок 11 – Феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия крупномасштабных взрывов и землетрясений

В первой части приведен ряд основных параметров сейсмического воздействия. Волновые поля от ПЯВ и массовых взрывов, с известной степенью приближения, соответствуют источнику в виде центра расширения в отличие сейсмического источника при землетрясении, который описывается двойной парой сил с квадрантным распределением сжатия и расширения. Во второй части представлены механизмы деформирования флюидонасыщенного коллектора и соответствующие схемы гидрогеологических откликов. В третьей – выделены основные параметры вариаций уровня, соответствующие необратимому, квазиобратимому и динамическому деформированию водонасыщенного коллектора.

Реакция водонасыщенного коллектора на взрывы и землетрясения проявляется на макро-, мезо- и микроуровне в соответствующих зонах и согласуется с предположением о наличии статистического подобия процессов деформирования геофизической среды при сейсмическом воздействии [Садовский и др., 1987]. Влияние атмосферного давления и земных приливов на вариации уровня подземных вод может рассматриваться в качестве зондирующего сигнала для определения фильтрационных параметров водонасыщенного коллектора.

Гидрогеологические отклики флюидонасыщенного коллектора обычно описываются двумя возможными типами моделей напряжений: статической и

динамической [Shi et al., 2014]. Модель статической деформации предполагает необратимые изменения свойств коллектора, вызванные скольжением (распространением разрывов) вдоль разлома как прямой результат процессов в очаге [Wakita, 1975; Quilty, Roeloffs, 1997; Ge, Stover, 2000] и формированием зон наведенной трещиноватости в центральной зоне ПЯВ, которые прослеживаются в виде косейсмических ступенеобразных и плавных длительных изменений уровня подземных вод. Амплитуда квазистатического изменения напряжения на расстояниях свыше нескольких размеров очага уменьшается пропорционально кубу расстояния.

В переходной зоне прослежены различные по продолжительности и интенсивности вариации уровней водоносных горизонтов, зависящие от локальных гидрогеологических условий [Горбунова, 2018б; King et al., 1999; Manga et al., 2012; Shi et al., 2015]. Вариации напряжений, которые связаны с прохождением сейсмических волн от взрывов и землетрясений, влияют на проницаемость и подвижность флюидов в геологической среде. В дальней зоне преимущественно регистрируются косейсмические вариации уровня и давления в системе «пласт-скважина», так как на больших эпицентральных расстояниях изменения статических очень малы по сравнению с динамическими напряжениями. В единичных случаях при катастрофических землетрясениях отмечены постсейсмические эффекты, которые могут быть связаны, например, с кольтатацией/декольтатацией трещин, разрушением/образованием коллоидных барьеров [Кочарян и др., 2011а; Brodsky et al., 2003; Shi et al., 2015].

Зарегистрированные гидрогеологические эффекты при проведении ПЯВ, на территории ГФО «Михнево» от удаленных землетрясений и в зоне разрабатываемых железорудных месторождений КМА вынесены на сводную диаграмму, построенную по данным [Shi et al., 2015], и дополняют мировую базу данных регистрации гидрогеологических откликов на расстоянии менее 10 км и более 1000 км (рис. 12).

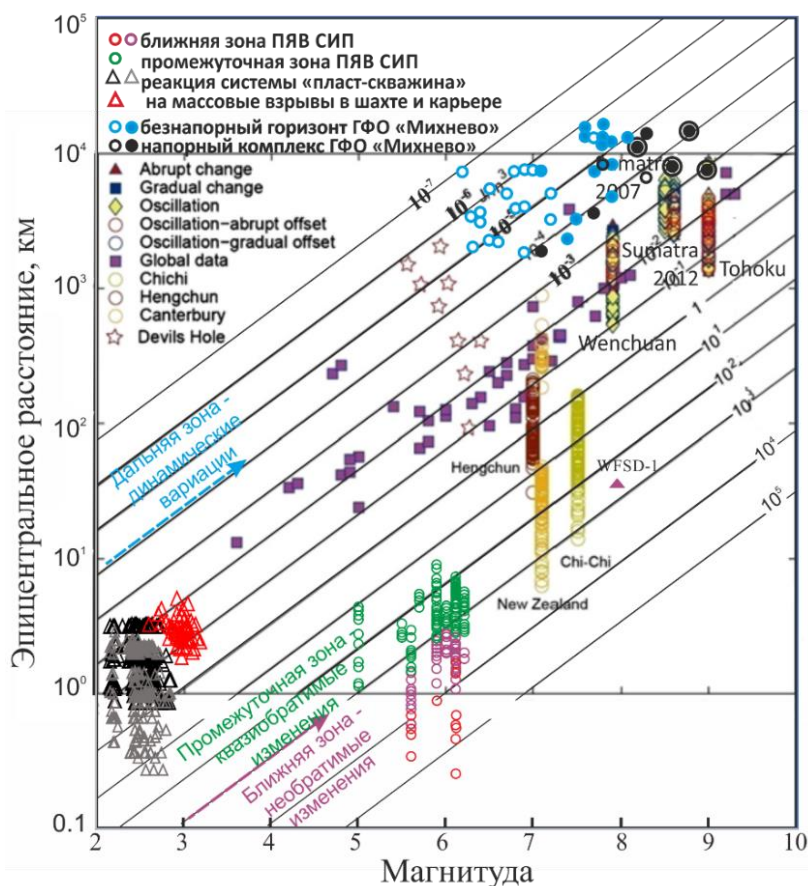


Рисунок 12 – Диаграмма регистрации гидрогеологических эффектов при землетрясениях по данным [Shi et al., 2015], на территории ГФО «Михнево» (I типа – пустые кружки, II типа – залитые, III типа – двойной кружок), в зоне разработке железорудных месторождений КМА (отклик в скв.1-1 - черные треугольники, скв.2-1 – серые при взрывах в шахте, в скв.1-1 и 2-1 - красные при взрывах в карьере) и при ПЯВ на территории СИП в ближней зоне (скачкообразные изменения – красные кружки и постепенные – фиолетовые) и промежуточной (зеленые)

В широком диапазоне параметров установлена степенная зависимость амплитуд максимальных вариаций уровня подземных вод от величины максимальной скорости смещения грунта (PGV) (рис. 13).

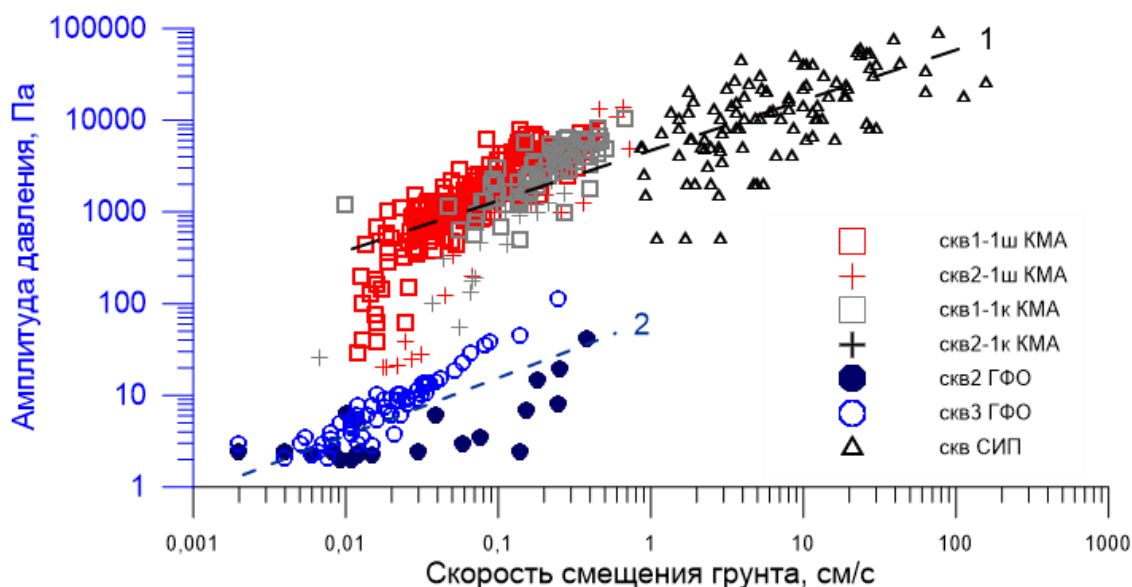


Рисунок 13 – Зависимость амплитуд давления в системе «пласт-скважина» от максимальной скорости смещения грунта (пунктир - степенная функция: 1 - для взрывов, произведенных на СИП и КМА, $P = 5044 \cdot U_m^{0.57}$, коэффициент корреляции $R=0.64$; 2 – для землетрясений, зарегистрированных на территории ГФО «Михнево», $P = 61.5 \cdot U_m^{0.58}$, коэффициент корреляции $R=0.53$; красные значки соответствуют значениям, зарегистрированным при массовых взрывах камер в шахте, серые – подрывам блоков в карьере)

В ближней зоне крупномасштабных взрывов и землетрясений при $PGV > \sim 100$ см/с необратимые изменения физико-механических и фильтрационных свойств массива горных пород определяют область нарушения гидрогеодинамической обстановки. Изменения основных параметров подземного потока, на порядок превышающие фоновые вариации, соответствуют формированию гидравлической взаимосвязи между зонами наведенной трещиноватости и свидетельствуют о необратимом деформировании водонасыщенного коллектора.

В промежуточной зоне $PGV \sim 1-100$ см/с локальное нарушение структуры порово-трещинного пространства приводит к квазиобратимому деформированию коллектора, которое проявляется в виде постепенного и/или скачкообразного подъема/снижения уровня с последующей стабилизацией режима подземных вод. В дальней зоне $PGV < \sim 1$ см/с квазиупругое и пороупругое деформирование водонасыщенных коллекторов может приводить к вариациям уровня и давления в системе «пласт-скважина».

Гидрогеологический отклик на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов по-разному выражен в водонасыщенных коллекторах порового и трещинно-пластового типов из-за различия фильтрационных параметров. Наряду с преобладанием динамических вариаций уровня, которые соответствуют упругому деформированию водонасыщенного коллектора, в отдельных случаях прослеживаются остаточное снижение или подъем уровня [Горбунова и др., 2018а; Копылова, Болдина, 2019, 2020; Sun et al., 2015]. В единичных случаях при скорости смещения грунта более 1.5 мм/с прослежен постсейсмический эффект изменения уровня подземных вод. Для разных зон динамического воздействия целесообразно рассматривать различные механизмы или сочетание механизмов деформирования водонасыщенного коллектора.

Основные выводы к главе 6.

1. Изменение гидрогеодинамической обстановки после проведения ПЯВ на отдельных участках Семипалатинского полигона связано с необратимым и неравномерным деформированием водонасыщенного коллектора и зависит как от параметров ПЯВ, так и от геолого-структурных и гидрогеологических условий, наличия техногенно-ослабленных зон от проведения предыдущих взрывов. В наблюдательных скважинах при крупномасштабных взрывах регистрируется кратковременное повышение уровня, вызванное действием волны сжатия (в отдельных случаях – фонтанирование скважин) и снижение уровня водоносного горизонта до отметок ниже первоначальных из-за установления гидравлической связи с зонами наведенной трещиноватости. Процесс последующего восстановления уровня подземных вод зависит от гидрогеологической ситуации. Режим деформирования гидрогеологически активных зон разрывных нарушений в дальней зоне сопоставим с реакцией массива горных пород на крупномасштабное техногенное воздействие, зарегистрированное в ближней зоне.

2. Локальное нарушение структуры порово-трещинного пространства приводит к квазиобратимому деформированию коллектора, которое проявляется в виде постепенного и/или скачкообразного подъема/снижения уровня. В дальней зоне квазиупругое и пороупругое деформирование водонасыщенного коллектора при динамическом воздействии низкочастотных поверхностных колебаний от удаленных землетрясений и высокочастотных – от массовых взрывов выражается в вариациях уровня и давления в системе «пласт-скважина» соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы определены основные закономерности реакции водонасыщенного коллектора на динамические квазистационарные и периодические факторы, разработан метод дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора и получены следующие основные результаты:

1. Установлена степенная зависимость амплитуды максимального снижения уровня подземных вод после ПЯВ от эпицентрального расстояния. Локальная депрессия, осложняющая подземный поток, может сохраняться длительное время не только на приведенных расстояниях до $2.7 \text{ м/кг}^{1/3}$, но и прослеживаться в зоне влияния региональных разломов, на приведенных расстояниях до $5.6 \text{ м/кг}^{1/3}$. На эпицентральных расстояниях более $5.6 \text{ м/кг}^{1/3}$ отмечены динамические вариации уровня, выраженные преимущественно в плавном снижении уровня подземных вод за счет частичной сработки статических запасов водоносного горизонта, связанной с постепенным заполнением систем подновленной петрогенетической, тектонической и сформированной техногенной трещиноватости.

2. Определен диапазон фоновых вариаций проницаемости водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-пластового типов на основе оценки фазового сдвига между приливной полусуточной волной лунного типа M_2 , выделенной в смещении грунта и уровне водоносного горизонта. Применение оригинального подхода к обработке исходных данных позволило в относительно нестабильных условиях режима фильтрации обосновать выделение представительного и достоверного диапазона значений фазового сдвига для расчета водопроводимости напорного водоносного горизонта. Проницаемость карбонатного коллектора на территории ГФО «Михнево» изменяется от $8.2 \cdot 10^{-14}$ до $15.4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$, в пределах разрабатываемых железорудных месторождений КМА проницаемость кварцита не превышает $(0.1-1.4) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$.

3. Установлено, что реакция подземных вод на территории обсерватории ИДГ РАН «Михнево» на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений соответствует динамике деформирования водонасыщенного коллектора. Синхронизация вариаций уровня и скорости смещения грунтов в высокочастотном диапазоне подтверждает упругое деформирование водонасыщенного коллектора. Дополнительно прослеживание

реакции подземных вод в области низких частот, вероятно, свидетельствует о квазиупругом деформировании коллектора.

4. Получены новые данные по реакции водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-пластового типов на проведение массовых взрывов при разработке железорудных месторождений КМА. Определены амплитудно-частотные параметры реакции системы «пласт-скважина» на взрывное воздействие. Максимумы спектров гидрогеологических откликов верхнего и нижнего горизонта надрудного комплекса различаются и не совпадают с экстремумами спектров скорости смещения грунта.

5. Установлено различие реакции коллекторов трещинно-порового и порового типа на динамическое воздействие и рассчитаны диапазоны динамического деформирования различных типов коллекторов при прохождении сейсмических волн от землетрясений и массовых взрывов. При землетрясениях при скорости смещения грунта от 0.08 до 3.8 мм/с и относительной деформации коллектора $(0.1-6) \cdot 10^{-7}$ амплитуда отклика напорного горизонта варьирует от 2.2 до 41.5 мм, слабонапорного – от 2.1 до 110.6 мм. При массовых взрывах при скорости смещения грунта 0.3-14.4 мм/с амплитуда давления в системе «пласт-скважина» изменяется в широком диапазоне от 20 Па до 10 кПа.

6. Определена степенная зависимость реакции водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-пластового типов в естественных и техногенно-нарушенных условиях от максимальной массовой скорости смещения грунта при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений и взрывов. Максимумы спектров гидрогеологических откликов коллекторов порового и трещинно-пластового типов различаются. Максимумы амплитудных спектров гидрогеологических откликов карбонатного коллектора при прохождении сейсмических волн от землетрясений преимущественно регистрируются в диапазоне 0.03-0.06 Гц. При взрывах максимумы спектров гидрогеологических откликов коллектора порового и трещинно-порового типа в диапазоне частот 1-10 Гц соотносятся с экстремумами скорости смещения грунта, в диапазоне частот более 10 Гц - рассинхронизированы.

7. Отмечено подобие проявлений постсейсмических эффектов после землетрясений и взрывов при максимальной скорости смещения грунта более 1 мм/с и давлении в системе «пласт-скважина» более 10 кПа. Наличие постсейсмических эффектов соответствует квазиобратимому изменению структуры трещинно-порового пространства и порового давления. Одним из возможных механизмов может быть процесс разрушения коллоидных барьеров, образованных вдоль стенок микротрещин.

8. Предложена феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие от крупномасштабных взрывов, произведенных на площадках СИП, массовых взрывов, связанных с процессом разработки железорудных месторождений КМА, и удаленных землетрясений. На основе анализа гидрогеологических эффектов, зарегистрированных в природной геосистеме на территории ГФО «Михнево» и природно-техногенных геосистемах – на ряде объектов СИП и промышленном регионе, определены основные режимы деформирования водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-пластового типов при динамическом воздействии.

Гидрогеологические отклики водонасыщенного коллектора на квазистатическое и периодическое воздействие могут проявиться в виде триггеров активизации различных природно-техногенных процессов. Разработанные методы, подходы и модели могут оказаться полезными при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов повышенного уровня ответственности в сложных инженерно-геологических условиях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Адушкин В.В., Санина И.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Исследование неотектонической активности морфоструктур центральной

- части Восточно-Европейской платформы с использованием дистанционных методов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 21–28.
2. Адушкин В.В., Санина И.А., Владимирова И.С., Габсатаров Ю.В., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Современные геодинамически активные зоны центральной части Восточно-Европейской платформы // ДАН. 2013а. Т. 452. № 5. С. 558–561.
3. Адушкин В.В., Санина И.А., Габсатарова И.П., Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Техногенно-тектонические землетрясения Днепровско-Донецкого авлакогена // ДАН. 2016. Т. 469. № 4. С. 479–482.
4. Адушкин В.В., Санина И.А., Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Габсатарова И.П., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А. Сейсмогенные древние структуры центра и севера Восточно-Европейской платформы // ДАН. 2019. Т. 489. № 4. С. 73–76.
5. Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Каазик П.Б., Недбаев И.Н. Основные закономерности движения подземных вод при крупномасштабных подземных взрывах // Известия РАН, Физика Земли. 1992. № 3. С. 80–93.
6. Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Рябова С.А., Харламов В.А. Синхронные вариации магнитного поля Земли и уровня подземных вод // ДАН. Т. 449. 2013б. № 5. С. 579–581.
7. Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Ферапонтова Е.Н. Гидрогеологические эффекты подземных ядерных взрывов // Докл. РАН. 1993. Т. 332. № 3. С. 372–374.
8. Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М. Динамическое деформирование флюидонасыщенных коллекторов по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга на территории геофизической обсерватории "Михнево" // Процессы в геосредах. 2020. № 4 (26). С. 867–876.
9. Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С., Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В. Отклик водонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Часть 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод // Физика Земли. 2015. № 1. С. 73–82.
10. Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Мониторинг уровня подземных вод по данным прецизионных измерений // Геоэкология. 2011а. № 8. С. 439–449.
11. Горбунова Э.М. Влияние структурно-тектонических условий на распределение афтершоков после крупномасштабного техногенного воздействия // Геоэкология. 2007. № 5. С. 421–428.
12. Горбунова Э.М. Исследование поствзрывных деформаций дневной поверхности // Геоэкология. 2018а. № 5. С. 40–52.
13. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Прецизионный гидрогеологический мониторинг в техногенно-нарушенных условиях: организация, проведение и обработка экспериментальных данных // Сейсмические приборы. 2021а. Т. 57. № 2. С. 62–80. <https://doi.org/10.21455/si2021.2-4>.
14. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) // Физика Земли. 2021б. № 5. С. 74–90. <https://doi.org/10.31857/S000233721050070>.
15. Горбунова Э.М., Виноградов Е.А., Беседина А.Н., Гашев Д.В. Реакция подземных вод на землетрясения и крупномасштабные взрывы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017а. № 1. С. 273–290.
16. Горбунова Э.М., Спивак А.А. Изменение режима подземных вод при подземных ядерных взрывах // Геоэкология. 1997. № 6. С. 29–37.
17. Гордеев С.К., Ермаков А.И., Квасникова Е.В., Горбунова Э.М. Радионуклидный состав подземных вод и почвы вблизи подземного ядерного взрыва на Семипалатинском полигоне // Атомная энергия. 2007. Т. 103. Вып. 3. С. 204–206.

18. Копылова Г.Н., Горбунова Э.М., Болдина С.В., Павлов Д.В. Оценка деформационных свойств системы “пласт-скважина” на основе анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине // Физика Земли. 2009. № 10. С. 69–78.
19. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011а. № 12. С. 50–62.
20. Кочарян Г.Г., Гамбурцева Н.Г., Санина И.А., Данилова Т.В., Нестеркина М.А., Горбунова Э.М., Иванченко Г.Н. Временные вариации характеристик локальных участков земной коры по данным сейсмических наблюдений // Физика Земли. 2011б. № 4. С. 58–66.
21. Санина И.А., Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Габсатарова И.П. Сейсмотектоническая обстановка землетрясения 7 августа и его афтершоков // Физика Земли. 2019. № 2. С. 1–13.
22. Санина И.А., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Горбунова Э.М. Идентификация нетектонических сигналов от близкорасположенных источников на МСА "Михнево" // Геофизические исследования. 2013. Т. 14. № 4. С. 36–45.
23. Санина И.А., Турунтаев С.Б., Горбунова Э.М., Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л. Развитие методов выявления пространственно-временных вариаций фильтрационных свойств коллекторов месторождений углеводородов по данным микросейсмического мониторинга // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2014. № 1(9). С. 8–20.
24. Свинцов И.С., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В. Характеристика состояния водонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 158–165.
25. Спивак А.А., Спунгин В.Г., Бугаев Е.Г., Горбунова Э.М. Диагностика тектонических структур территории Ново-Воронежской АЭС на основе анализа микросейсмических колебаний // Геоэкология. 1999. № 3. С. 268–276.
26. Святовец С.В., Шпаковский В.И., Стажило-Алексеев С.К., Горбунова Э.М. Влияние гидрогеологических условий расположения скважин ГГД-мониторинга на представимость получаемых данных // Разведка и охрана недр. 2008. № 10. С. 64–66.
- Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science**
1. Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I. Chilen Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform // Pure and Applied Geophysics. 2016. 173 (2). P. 321–330.
 2. Gorbunova E. Large-Scale Explosion and Induced Seismicity: Geological, Structural, and Hydrogeological Impacts. Pure and Applied Geophysics. 2021. 178 (4). P. 1223–1234.
 3. Gorbunova E.M. Peculiarities of radionuclide distribution within rock destruction zones (by the example of the objects at the Semipalatinsk Test Site) // Uranium, Mining and Hydrogeology. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 2008. P. 531–537.
 4. Gorbunova E.M. Typification of Radioactive Contamination Conditions in Ground Water at the Semipalatinsk Test Site // Uranium in the Environment. Mining Impact and Consequences. Freiberg, Springer. 2005. P. 823–829.
 5. Gorbunova E.M., Besedina A.N. Study of the hydrogeological responses from the far earthquakes // SGEM 2019. Conference Proceedings 19. Issue 1.2. Bulgaria. 2019. P. 507–514.
 6. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Batukhtin I.V., Petukhova S.M. Hydrogeological Responses of Fluid Saturated Collectors to Remote Earthquakes // Processes in GeoMedia – Volume IV. Switzerland: Springer Geology. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_22.
 7. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Kabychenko N.V., Batukhtin I.V., Petukhova S.M. Study of hydrogeological responses of dual porous collectors to dynamic deformation of rock mass. AIP Conference Proceedings. 2021. 2051.
 8. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Vinogradov E.A. Reaction of the fluid saturated collector during the propagation of the seismic waves // AIP Conference proceedings. 2051, 020100. 2018a. DOI: 10.1063/1.5083343.

9. Gorbunova E.M., Besedina A.N., Vinogradov E.A. Water level response recorded at Russian Platform to remote earthquakes // SGEM 2018 Conference Proceedings 18. Issue 1.2. Bulgaria. 2018b. P. 759–766.
10. Gorbunova E.M., Subbotin S.B. Study of the radionuclide transport by underground water at the Semipalatinsk Test Site // Uranium Mining and Hydrogeology. The new uranium mining boom. Challenge and lessons learned. Freiberg. Germany. 2011. P. 335–342.
11. Gorbunova E.M., Vinogradov E.A., Besedina A.N. Aquifer properties distant control // SGEM 2017/ Conference Proceedings 17. Issue 1.2. Bulgaria. 2017. P. 71–78.
12. Kabychenko N.V., Gorbunova E.M., Besedina A.N. Deformation mode of water-saturated collector by precision hydrogeological monitoring // AIP Conference Proceedings 2167, 020142. 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5132009>.
13. Kabychenko N.V., Gorbunova E.M., Besedina A.N. Study of Amplitude-Frequency Characteristics of Water-Saturated Collector // AIP Conference Proceedings 2310, 020128. 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0034394>.
14. Kocharyan G., Vinogradov E., Gorbunova E., Kabychenko N., Pavlov D., Svintsov I. Special Features of Tides in Precise Measurements of Ground Water Level // SGEM 2010 Conference Proceedings 10. Issue 1.2. Bulgaria. 2010. P. 67–74.
15. Pavlov D.V., Besedina A.N., Gorbunova E.M., Ostapchuk A.A. Response of an aquifer to the passage of seismic waves in the close-in zone of a ripple-fired explosion in a mine // International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. Norwegian Group for Rock Mechanics. EUROCK2020 Symposium Proceedings. ISBN 978-82-8208-072-9. ISRM-EUROCK-2020-166. 2020.
16. Vinogradov E.A., Besedina A.N., Gorbunova E.M., Svintsov I.S. Precision monitoring of underground water conditions disturbed by technogenic cause // SGEM 2015 Conference Proceedings 15. Issue 1.2. Bulgaria. 2015. P. 563–570.
17. Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Besedina A.N. Study of fractured collector state change with recurrent pumping // SGEM 2016. Conference Proceedings 16. Issue 1.1. Bulgaria. 2016. P. 997–1004.
18. Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth Tide Analysis Specifics in Case of Unstable Aquifer Regime // Pure and Applied Geophysics. Vol.174. № 6. 2017. ISSN 0033-4553. DOI: 10.1007/s00024-017-1585-z.

Другие публикации

1. Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Свинцов И.С. Отклик коллекторов подземных вод на слабые сейсмические волны удаленных землетрясений // Геодинамика. Львов: Изд-во Львівської політехніки. № 2 (11) 2011б. С. 49–51.
2. Горбунова Э.М. Гидрогеодинамическая обстановка массива Дегелен Семипалатинского полигона // Вестник НЯЦ РК. Вып. 2 (50). Курчатov: НЯЦ РК. 2012. С. 108–114.
3. Горбунова Э.М. Изучение последствий техногенной дестабилизации недр Семипалатинского испытательного полигона // Международная конференция “Мониторинг ядерных испытаний и их последствий”. Вестник НЯЦ РК. Вып. 2 (18). Курчатov: НЯЦ РК. 2004. С. 82–88.
4. Горбунова Э.М. Мониторинг режима подземных вод на участках проведения крупномасштабных экспериментов // Вестник НЯЦ РК. Вып. 4. Курчатov: НЯЦ РК. 2015. С. 71–78.
5. Горбунова Э.М. Определение режима деформирования массива горных пород по данным мониторинга уровня подземных вод на территории Семипалатинского полигона // Вестник НЯЦ РК. Вып. 2 (74). Курчатov: НЯЦ РК. 2018б. С. 78–87.
6. Горбунова Э.М. Особенности деформирования массива горных пород при воздействии взрывом (на примере участка Заречье Семипалатинского испытательного полигона) // Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК. Вып. 2. Курчатov: НЯЦ РК. 2003. С. 113–122.

7. Горбунова Э.М. Техногенное воздействие крупномасштабных экспериментов на подземные воды // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Вып. 17. Москва: РУДН. 2015. С. 333–338.
8. Горбунова Э.М., Батухтин И.В., Беседина А.Н., Павлов Д.В., Шарафиев З.З. Опыт измерений вариаций уровня подземных вод при массовых взрывах // Динамические процессы в геосферах. Вып. 11: Сб. научных трудов ИДГ РАН. РАН. М.: Графитекс. 2019. С. 17–26. DOI: 10.26006/IDG.2019.11.38611
9. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Батухтин И.В., Петухова С.М., Шарафиев З.З. Отклик коллектора на проведение взрывов в карьере Лебединского ГОКа // Динамические процессы в геосферах. Вып. 13: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: Графитекс. 2021в. С. 25–35. DOI: 10.26006/22228535_2021_1_25.
10. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А. Динамика деформирования водонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод // Динамические процессы в геосферах. Вып. 10: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: Графитекс. 2018а. С. 74–83.
11. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А. Прецизионный мониторинг уровня подземных вод // Сборник трудов Международного симпозиума «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере» (МСП-2018), посвященный 90-летию проф. К.Н. Федорова. М.: ИО РАН. 2018б. С. 90–93.
12. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Землетрясения Трансазиатского сейсмического пояса в вариациях уровня подземных вод Московского артезианского бассейна // Геология, геодинамика и геоэкология Кавказа. Труды Института геологии ДНЦ РАН. Выпуск 66. Махачкала: Институт геологии ДНЦ РАН. 2016а. С. 167–173.
13. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Информативность прецизионного мониторинга подземных вод в платформенных условиях // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып.18. Москва: РУДН. 2016б. С. 477–481.
14. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Оценка проницаемости трещинно-порового коллектора при эпизодическом техногенном воздействии // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2016в. С. 42–51.
15. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Реакция подземных вод на прохождение сейсмических волн от землетрясений на примере ГФО "Михнево" // Динамические процессы в геосферах. Вып. 7. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2015а. С. 60–67.
16. Горбунова Э.М., Виноградов Е.А., Беседина А.Н., Свинцов И.С. Исследование анизотропии фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга // Динамические процессы в геосферах. Вып. 9. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2017б. С. 59–67.
17. Горбунова Э.М., Иванов А.И. Изменение гидрогеологических параметров в техногенно-нарушенных условиях // Ядерная энергетика Республики Казахстан. Вестник НЯЦ РК. Вып. 2 (33). Курчатов: НЯЦ РК. 2007. С. 27–32.
18. Горбунова Э.М., Павлов Д.В., Ружич В.В. Изменение свойств массива горных пород под действием сейсмических колебаний // Триггерные эффекты в геосистемах: доклады третьего Всероссийского семинара-совещания, Москва, 16-19 июня 2015 г. М.: ГЕОС. 2015б. С. 121–128.
19. Горбунова Э.М., Свинцов И.С. Ретроспективный анализ режима подземных вод при проведении крупномасштабных экспериментов // Вестник НЯЦ РК. Вып.1 (49). Курчатов: НЯЦ РК. 2010. С. 88–96.

20. Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС. 2015. –112 с. (монография)