

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Горбуновой Эллы Михайловны

«Реакция водонасыщенного коллектора на динамические воздействия»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук

по специальности 1.6.6. – Гидрогеология и 1.6.9. – Геофизика

В состав требований государственного геологического изучения недр входит мониторинг состояния недр и прогнозирование происходящих в нем процессов. Переход на новый уровень научно-методического сопровождения процессов разработки месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа с использованием высокоточных датчиков, установленных в наблюдательных скважинах, позволяет осуществлять постоянный контроль режима подземных вод. **Актуальность работы**, направленной на исследование реакции водонасыщенных коллекторов на динамические воздействия под влиянием квазистационарных и периодических факторов, обусловлена необходимостью прогнозной оценки геодинамической и геоэкологической безопасности эксплуатации недр. Изменение гидрогеологической ситуации предопределяет вид и степень развития опасных природно-техногенных процессов, к которым относятся карст, суффозия и другие. В ряде случаев процессы эксплуатации нефтегазоносных месторождений в режиме отбора из продуктивных пластов и нагнетания сопровождаются наведенной микросейсмичностью. Соответственно представленная работа имеет прикладную и теоретическую направленность, так как позволяет существенно продвинуться в решении проблемы взаимодействия различных компонент геофизической среды.

Цель работы соответствует современным направлениям исследований геомеханических и гидрогеодинамических процессов, происходящих в земной коре, и заключается в определении основных закономерностей реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия различной интенсивности и развитии метода дистанционного контроля фильтрационных свойств коллектора.

Для достижения поставленной цели диссертантом были поставлены и решены **основные задачи исследований**:

- установлены взаимосвязи между изменениями гидрогеодинамической обстановки и формированием областей поствзрывных деформаций в массиве горных пород;
- определено соответствие между основными типами гидрогеологических откликов и режимами деформирования водонасыщенного коллектора в естественных и техногенно-нарушенных условиях;
- разработана феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия.

Диссертационная работа Горбуновой Э.М. развивает исследования влияния сейсмических колебаний от взрывов и землетрясений на динамику деформирования среды, которые отражены в работах академика В.В. Адушкина, В.Н. Костюченко, Г.Г. Кочаряна, А.А. Спивака и других в рамках концепции блочно-иерархического строения земной коры, предложенной академиком М.А. Садовским, с использованием новых данных прецизионного гидрогеологического мониторинга. В рамках диссертационной работы продолжено изучение гидрогеологических эффектов, связанных с влиянием различных факторов, результаты которого представлены в статьях и монографиях И.С. Киссина, В.О. Волейшо, Д.Г. Осики, А.Н. Султанходжаева, Г.С. Вартапяна, Г.В. Куликова, Г.Н. Копыловой и других.

Цели и задачи исследования определили структуру и логику диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Текст работы занимает 262 страницы, включая 158 рисунков, 20 таблиц и 15 страниц библиографии, состоящей из 248 наименований. Автореферат изложен на 38 страницах текста, включающих 13 рисунков.

Во введении приведена общая характеристика работы и описаны актуальность, объекты, цель, новизна и достоверность результатов исследований, перечислены пять защищаемых положений, указан личный вклад диссертанта.

В первой главе представлен обзор опубликованных результатов гидрогеологических откликов на атмосферное давление, земные приливы, вызванные землетрясениями и высокоинтенсивным техногенным воздействием на водонасыщенный коллектор. Обзор выполнен достаточно качественно и основан на анализе результатов исследований, проведенных в различных регионах, преимущественно с использованием высокоточных датчиков уровня подземных вод. Особую значимость представляет обобщение геолого-геофизических и гидрогеологических данных, зарегистрированных при проведении трех крупномасштабных взрывов на глубине от 0.7 до 1.8 км на острове Амчитка.

Во второй главе детально рассмотрен комплекс полевых геолого-геофизических и гидрогеологических работ на Семипалатинском полигоне, который выполнялся в два этапа – до и после проведения крупномасштабного взрыва. Для регистрации реакции подземных вод на взрывное воздействие осуществлялись специальные работы при проведении 29 взрывов в боевых скважинах и 15 взрывах в штольнях (горизонтальных горных выработках). При ряде экспериментов были впервые получены аналоговые записи вариаций уровня в момент взрыва. Результаты комплексных исследований использовались для составления схематических инженерно-геологических и гидрогеологических карт участков и разрезов, анализа последствий изменения состояния дневной поверхности и массива горных пород, его эффективных характеристик и гидрогеодинамической обстановки после высокоинтенсивного воздействия.

Для анализа приливных волн в пределах выбранных интервалов высокоточной регистрации уровней подземных вод в наблюдательных скважинах, расположенных в природной и природно-техногенной геосистемах, выполнена фильтрация узким полосовым фильтром в диапазонах 12.32-12.52 часа и 25.7-25.9 часа после децимации и приведения шага по времени к 300 с. Приливы в смещении грунта по вертикальной компоненте рассчитаны с использованием программного пакета ETERNA 3.0 применительно к координатам площадок. Для оценки фазового сдвига между приливной компонентой M_2 , выделенной в уровне напорного водоносного горизонта и смещении грунта, применен новый метод, основанный на построении фазовых траекторий в координатах «смещение грунта – изменение уровня воды» в виде эллипсов. Полученные значения фазового сдвига использованы для расчета водопроницаемости и проницаемости пород в рамках пороупругой модели.

Для анализа реакции водонасыщенного коллектора на удаленные землетрясения и массовые взрывы рассчитаны и построены амплитудные и нормированные спектры по трем компонентам скорости смещения грунта и вариациям давления в системе «пласт-скважина». Экспериментальные данные, полученные на территории геофизической обсерватории ИЛГ РАН «Михнево» и в пределах разрабатываемых железорудных месторождений, использованы для оценки относительной деформации коллектора. Комплексирование методов, включающее обработку результатов высокоточных измерений, направлено на исследование основных закономерностей реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия квазистационарных факторов (атмосферное давление, земные приливы) и периодических (удаленные землетрясения, массовые взрывы и техногенная помеха).

На основе выполненных исследований автором сформулировано первое защищаемое положение по разработке методики дистанционной оценки фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора. Обоснованность первого положения подтверждена результатами работ, представленными во второй главе диссертации, и базируется, во-первых, на обработке большого объема данных, полученных при проведении крупномасштабных взрывов на территории Семипалатинского испытательного полигона. Во-вторых, на использовании сформированной базы данных высокоточных измерений уровня подземных вод, проводимых в пределах природной геосистемы – территории геофизической обсерватории «Михнево» и природно-техногенной геосистемы – территории разрабатываемых железорудных месторождений Курской магнитной аномалии. В-третьих, на анализе экспериментальных данных по гидрогеологическим откликам, зарегистрированным в пунктах наблюдений, на прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений, произошедших на различных эпицентральных расстояниях и направлениях, и взрывов, производимых при открытой и подземной разработке железорудных залежей.

При формулировке первого защищаемого положения были учтены опубликованные результаты исследований гидрогеологических откликов, полученные преимущественно по данным высокоточного мониторинга уровня подземных вод в России и за рубежом, которые систематизированы и проанализированы в рамках первой главы диссертационной работы.

В третьей главе приведена характеристика геолого-структурных и гидрогеологических условий площадок исследований. Площадки Семипалатинского испытательного полигона («Балапан» и «Дегелен») и разрабатываемых железорудных месторождений отнесены к природно-техногенным геосистемам, так как в их пределах происходит трансформация природной среды под воздействием техногенных факторов. Площадка территории геофизической обсерватории «Михнево» рассматривается как природная, так как расположена на северо-восточной окраине Приокско-Террасного государственного биосферного заповедника. Выполненный анализ геологического строения и гидрогеологической ситуации площадок исследований использован при формулировке защищаемых положений.

В четвертой главе представлены результаты исследований необратимого деформирования массива горных пород при высокоинтенсивном воздействии и особенности формирования природно-техногенной геосистемы, которые подтверждены изменением физико-механических и геофизических параметров пород, фильтрационной

структуры массива и образованием техногенных микроформ рельефа. Повышенная проницаемость пород в пределах тектонически и техногенно ослабленных участков, приуроченных к разломам и литологическим контактам, способствует вертикальной миграции атмосферных осадков, талых вод и определяет формирование емкостных запасов трещинно-жильных вод. На примере обработки данных годового цикла гидрогеологического мониторинга одной из штолен до и после проведения взрыва получены результаты, свидетельствующие о неоднозначных изменениях проницаемости массива и межблоковых зон. По материалам повторной документации горизонтальных горных выработок установлено изменение модуля трещиноватости и коэффициента трещинной пустотности, наиболее значимо выраженное для интервалов распространения относительно монолитных пород.

Необратимые изменения состояния массива и разломов в зоне влияния крупномасштабных взрывов вызывают дренирование трещинно-пластовых и трещинно-жильных вод, получающих преимущественное развитие в зонах повышенной трещиноватости пород. Режим трещинно-пластовых вод, приуроченных к зоне экзогенного выветривания, за счет привлечения дополнительных естественных ресурсов постепенно восстанавливается. Продолжительность процесса восстановления уровня поверхности зависит от эпицентрального расстояния и близости области питания подземных вод, приуроченной к водораздельной части массива. Формирование техногенно-нарушенной гидрогеодинамической обстановки прослежено в вариациях водопритоков в горных выработках и уровня в наблюдательных скважинах, изменении основных параметров подземного потока – расходов, уклонов, скорости, превышающих фоновые (сезонные) вариации этих значений на порядок.

Пространственно-временное перераспределение подземного потока на площадке «Балапан» происходит за счет формирования наведенной трещиноватости в эпицентре взрыва и вдоль структурных границ разного ранга, прослеженной в плане и разрезе скважин за счет сдвижения интервалов водопритоков и изменения их интенсивности. Разрывные нарушения могут рассматриваться в качестве границ, контролирующих условия формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод и участков сдренированных пород.

На основе выполненных исследований в четвертой главе автором сформулировано второе защищаемое положение, которое подтверждено анализом обработанных данных по изучению зон необратимого деформирования, сформированных на дневной поверхности,

в массиве горных пород и в зонах разломов при проведении крупномасштабных взрывов в пределах площадок «Дегелен» и «Балапан» Семипалатинского полигона.

В пятой главе рассматривается влияние квазистационарных и периодических факторов на водонасыщенный коллектор. По данным высокоточного мониторинга уровня подземных вод, проводимого на территории геофизической обсерватории «Михнево» за период наблюдений 2010-2019 гг. зарегистрированы гидрогеологические отклики на 64 землетрясения с магнитудами 6.2-9.1, произошедшие на эпицентральных расстояниях от 1863 до 16507 км. В результате разработанной методики обработки данных определены три типа гидрогеологических откликов на удаленные землетрясения. Первый и второй типы соответствуют косейсмическим вариациям уровня и синхронны колебаниям грунта, вызванным прохождением сейсмических волн. Третий тип гидрогеологических эффектов представлен в виде плавного постсейсмического подъема уровня, устойчиво выраженного в низкочастотном диапазоне, наряду с косейсмическими вариациями уровня. На построенных нормированных спектрах скорости смещения грунта и уровня для первого и второго типов гидрогеологических эффектов установлено преимущественно совпадение экстремумов скорости смещения грунта и амплитуд уровня слабонапорного водоносного горизонта, реже - для ряда землетрясений отмечено смещение максимумов. Для гидрогеологических эффектов третьего типа на нормированных спектрах отчетливо прослежены изменения в распределении экстремумов уровня воды относительно экстремумов скорости смещения грунта по частоте и интенсивности.

В природно-техногенной геосистеме за период наблюдений 2019-2020 гг. зарегистрированы гидрогеологические отклики на проведение 63 массовых взрывов в шахте на глубине ~300 м от поверхности и 17 массовых взрывах в карьере на абсолютных отметках от 100 м до -300 м. В пределах разрабатываемых залежей рабочие камеры могут быть сгруппированы по пяти блокам, которые по-разному расположены относительно пункта наблюдений. Наиболее устойчивая степенная зависимость между максимальной скоростью смещения грунта, приведенным расстоянием и реакцией нижнего горизонта отмечается при проведении взрывов в восточном блоке. Массив горных пород, расположенный восточнее пункта наблюдений, представлен преимущественно целиком с единичными горными выработками.

Амплитуды давления в системе «пласт-скважина» в пределах нижнего горизонта, приуроченного к коллектору трещинно-порового типа, на порядок выше значений, прослеженных в верхнем горизонте, распространенном в пределах коллектора порового типа. При увеличении значений скорости смещения грунта до 10 мм/с и более

расхождение между амплитудами вариаций давления в водонасыщенных коллекторах порового и трещинно-пластового типов при сейсмическом воздействии уменьшается.

На основе выполненных исследований автором сформулировано третье защищаемое положение, обоснованность которого подтверждена результатами измерений и обработки экспериментальных данных, полученными в природной и природно-техногенной геосистемах и представленными в пятой главе.

В шестой главе проведено сравнение гидрогеологических откликов, зарегистрированных при различных типах сейсмического воздействия на массив, которое подтверждает сопоставимость реакции подземных вод как на разных этапах формирования зон наведенной трещиноватости при крупномасштабном воздействии на массив горных пород и в ближней зоне землетрясений, так и на разных эпицентральных расстояниях от источника сейсмического воздействия (в промежуточной и дальней зонах при массовых взрывах и удаленных землетрясениях соответственно). Для анализа режима деформирования массива горных пород после крупномасштабного взрыва наибольший интерес представляют значения максимального снижения уровня подземных вод, которые свидетельствуют о заполнении зон наведенной трещиноватости, сформированной при высокоинтенсивном воздействии.

Реакция подземных вод на удаленные землетрясения, зарегистрированные на территории геофизической обсерватории «Михнево», использована для оценки амплитудного фактора, который рассчитывается как отношение амплитудных спектров синхронизированных максимальных значений амплитуд уровня к скорости смещения грунта. Амплитудный фактор напорного и слабонапорного водоносных горизонтов за рассматриваемый период наблюдений является частотно-независимой функцией. Для анализа амплитудно-частотных параметров массовых взрывов выполнена фильтрация сейсмических и гидрогеологических данных в диапазонах 1-100 и 1-10 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.

Сформулированное четвертое защищаемое положение базируется на результатах обработки экспериментальных данных, полученных при проведении многолетнего высокоточного гидрогеологического мониторинга на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» и в пределах разрабатываемых железорудных месторождений, представленных в пятой и шестой главах.

Комплексный анализ опубликованных данных регистрации гидрогеологических откликов и результатов экспериментальных измерений, проводимых на территории Семипалатинского испытательного полигона, геофизической обсерватории «Михнево» и в промышленном регионе, использован для разработки феноменологической модели. В ближней зоне крупномасштабных взрывов на приведенных расстояниях до $2.7 \text{ м/кг}^{1/3}$ и эпицентральных зонах землетрясений прослежены остаточные изменения уровня подземных вод, которые свидетельствуют не только о необратимом деформировании водонасыщенного коллектора, но и об установлении гидравлической связи с сформированными зонами наведенной трещиноватости.

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 прослеживается остаточное снижение или подъем уровня. В единичных случаях, при скорости смещения грунта более 1.5 мм/с установлен постсейсмический эффект изменения уровня подземных вод. Для разных зон динамического воздействия целесообразно рассматривать различные механизмы или сочетание механизмов деформирования водонасыщенного коллектора.

Сформулированное автором пятое защищаемое положение подтверждено результатами исследований, выполненными при обработке всего объема представленных экспериментальных данных по регистрации гидрогеологических эффектов при проведении крупномасштабных взрывов и прохождении сейсмических волн от землетрясений и массовых взрывов, представленными в четвертой, пятой и шестой главах.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, которые свидетельствуют о выполнении поставленных задач. На основе анализа гидрогеологических эффектов, зарегистрированных в природной геосистеме на территории геофизической обсерватории «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.

Достоверность и новизна научных положений.

Достоверность научных положений по исследованию реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия подтверждена хорошей сходимостью

экспериментальных данных, полученных при выполнении работ на отдельных участках Семипалатинского полигона, территории геофизической обсерватории «Михнево» и в пределах разрабатываемых железорудных месторождений с опубликованными данными по изучению гидрогеологических откликов на экзогенное, эндогенное и техногенное воздействие. Используемые методы и подходы к решению задач соответствуют современному мировому уровню исследований и подтверждены публикацией полученных результатов в ведущих российских и зарубежных журналах.

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.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанный метод дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора и представленная феноменологическая модель способствует пониманию геомеханических и гидрогеодинамических процессов, происходящих в разных зонах, в том числе и в эпицентральной области землетрясений, которая мало изучена из-за отсутствия инструментальных измерений.

Практическая значимость работы заключается во внедрении современного метода дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора на разных этапах строительства и эксплуатации объектов повышенного уровня ответственности в сложных инженерно-геологических условиях. Разработанный научно-методический подход к обработке данных высокоточного гидрогеологического мониторинга будет полезен Федеральному агентству по недропользованию РФ, специалистам МЧС России и другим организациям.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы. **Публикации** автора отражают содержание диссертации. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 26 статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК РФ, 18 публикациях, проиндексированных в международных базах научных знаний Scopus, Web of Science, и одной монографии (в соавторстве). Личный вклад автора в решение задач, поставленных в работе, сформулирован в диссертации и не вызывает сомнений. Основные положения диссертации неоднократно обсуждались и докладывались на многочисленных всероссийских и международных

конференциях и совещаниях. Работа основана на обработке достаточно большого объема данных, полученных за многолетний период измерений на разных площадках.

Замечания по диссертации

1. В главе 2 «Методика исследования реакции водонасыщенного коллектора» на стр. 66 подробно приведено описание предложенного подхода для типизации гидрогеологических откликов на удаленные землетрясения, зарегистрированные на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». На рис. 5.21 на стр. 175 наглядно продемонстрировано различие между выделенными типами. Вместе с тем для сопоставления гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при проведении массовых взрывов в промышленном регионе, используются нормированные спектры, но градации реакции системы «пласт-скважина» на взрывное воздействие не приведено.

2. В диссертационной работе представлены результаты обработки данных по реакции системы «пласт-скважина» на массовые взрывы только для интервалов 40-секундной регистрации сейсмических, гидрогеологических и барометрических сигналов. Но особый интерес представляют постсейсмические эффекты, которые могут проявиться с запаздыванием по времени после проведения массовых взрывов и быть взаимосвязаны с формированием при взрывах зонами техногенной трещиноватости.


3. В диссертационной работе на стр. 199 отмечено, что гидрогеологические отклики на удаленные землетрясения в пределах разрабатываемых железорудных месторождений за рассматриваемый период не отмечены без возможного объяснения причин.

Сделанные замечания не являются определяющими и не снижают общего положительного впечатления от работы. Диссертация Э.М. Горбуновой, представленная на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне, которую по результатам исследований, проведенных автором в области гидрогеологического мониторинга геологической среды и комплексного анализа геофизических данных, можно квалифицировать как решение проблемы, имеющей значение для развития научно-методических основ дистанционного контроля состояния геолого-геофизической среды, в том числе, при разработке месторождений нефти и газа.

Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 5, 6, 12 паспорта научной специальности 1.6.6. Гидрогеология и пунктам 8, 16, 19 паспорта научной специальности 1.6.9. Геофизика. Вышеизложенное позволяет заключить, что диссертационная работа «Реакция водонасыщенного коллектора на динамические воздействия» соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении

ученых степеней» (утвержденного постановлением № 842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., с изменениями от 21 апреля 2016 г. «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней») для ученой степени доктора наук, а ее автор - Горбунова Элла Михайловна заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.6. - Гидрогеология и 1.6.9. - Геофизика.

Официальный оппонент,

доктор геолого-минералогических наук, профессор  Л.А. Абукова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, дом 3, телефон: +7 (499) 135-73-71, e-mail: abukova@ipng.ru

Я, Л.А. Абукова, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

«31» мар 2022 г.

Подпись Л. А. Абуковой удостоверяю
Ученый секретарь ИПНГ РАН





М.Н. Баганова