

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
океанологии им. П.П. Ширшова

Российской академии наук,
кандидат геолого-минералогических наук

В.П. Шевченко

2022 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
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 диссертационной работе Э.М. Горбуновой представлены научно-методические основы дистанционного мониторинга фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора в платформенных условиях и разработанная феноменологическая модель реакции такого коллектора на динамические воздействия.

Объект исследования – природная геосистема территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» и природно-техногенные геосистемы площадок «Дегелен» и «Балапан» Семипалатинского испытательного полигона, Коробковского и Лебединского железорудных месторождений КМА.

Цель исследований – определение основных закономерностей реакции водонасыщенного коллектора на динамические воздействия различной интенсивности и развитие методов дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора.

Результаты работы имеют важное прикладное значение, так как направлены на качественное понимание режима деформирования водонасыщенного коллектора при

экзогенном и эндогенном воздействии и могут быть востребованы при ведении горных работ с использованием взрывных технологий, закачке промышленных отходов в глубокие горизонты, эксплуатации подземных хранилищ нефти и газа.

Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью изучения изменений структуры порово-трещинного пространства и порового давления водонасыщенного коллектора под влиянием атмосферного давления, земных приливов, при сейсмическом воздействии удаленных землетрясений и промышленных взрывов, которые могут приводить к активизации природно-техногенных процессов.

Новизна полученных результатов и выводов в диссертации сформулирована корректно и не вызывает сомнений. Особое внимание заслуживают следующие аспекты работы:

- установлена эффективность дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора в платформенном регионе на основе высокоточных многолетних наблюдений за вариациями уровня подземных вод;

- впервые выполнена совместная интерпретация гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при взрывах и землетрясениях;

- впервые проведен амплитудно-частотный анализ реакции системы «пласт-скважина» на массовые взрывы, производимые при разработке железорудных месторождений.

Теоретическая значимость выполненных 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. Полученные результаты измерений при проведении крупномасштабных взрывов на Семипалатинском полигоне, прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений на территории геофизической обсерватории «Михнево», а также в зоне разрабатываемых железорудных месторождений дополняют мировую базу данных зарегистрированных гидрогеологических эффектов на расстоянии менее 1 км и более 1000 км.

Практическая значимость диссертационной работы отражена в анализе результатов высокоинтенсивного воздействия на водонасыщенный коллектор и высокоточных прецизионных измерений вариаций уровня подземных вод и давления в системе «пласт-скважина», которые необходимы для контроля негативных последствий ведения техногенной деятельности (при эксплуатации месторождений, подземной прокладке линейных трубопроводов и других объектов).

Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставимостью данных,

полученных в процессе комплексной обработки синхронной регистрации сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров с использованием высокоточных аппаратурно-измерительных комплексов. Результаты обработки экспериментальных данных с применением взаимодополняющих методик согласуются с теоретическими расчетами.

Оценка содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения. Объем – 262 страницы текста, 158 рисунков и 20 таблиц. Список использованных источников содержит 248 наименований.

Во **введении** приведены цель и основные задачи работы, обоснована актуальность выполненного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения по степени достоверности и апробации результатов, личному вкладу автора.

В **главе 1** представлен обзор опубликованных результатов исследований гидрогеологических откликов на динамические воздействия. Рассмотрены основные направления исследований, которые используются для расчета фильтрационных свойств коллектора. Обработка данных синхронных измерений атмосферного давления, приливных деформаций и уровня подземных вод направлена на оценку эффективности воздействия внешних факторов на флюидодинамический режим. В соответствии с теорией пороупругости изменения атмосферного давления вызывают вариации порового давления водонасыщенного коллектора, которые регистрируются в виде изменений уровня подземных вод. Для характеристики приливного воздействия на коллектор определяются фазовые соотношения между приливными компонентами, выделенными в вариациях смещения и объемной деформации, и уровнем подземных вод. Приливной отклик зависит от литологии вмещающих пород, которая обуславливает сжимаемость коллектора с различной пористостью. Для барометрического отклика подобная зависимость не прослеживается.

Наиболее подробно рассмотрены гидрогеологические эффекты, связанные с катастрофическими землетрясениями, произошедшими в зоне субдукции (11.03.2011 г. Тохоку М 9.1) и внутри тектонических плит (12.05.2008 г. Венчуань М 7.9 и 21.09.1999 г. Чи-Чи М 7.3). В диссертационной работе отмечено, что оценка возможных изменений фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора, связанных с прохождением сейсмических волн от землетрясений, в большинстве случаев проводится без анализа фоновых вариаций проницаемости, которые необходимо учитывать. Особый интерес представляют экспериментальные данные, полученные при проведении крупномасштабных взрывов на испытательных полигонах мира. Установлены основные этапы изменения уровня подземных вод, подтверждающие необратимые изменения

состояния массива горных пород в эпицентральной зоне взрыва. Наибольшие амплитуды смещения грунта, связанные с проведением крупномасштабных взрывов, приуроченные к серии разломов, прослежены не только на дневной поверхности, но и подтверждены результатами повторных измерений, проведенных в море. Неоднородность строения геологической среды предопределяет многообразие гидрогеологических эффектов, которые регистрируются на разных эпицентральных расстояниях.

В главе 2 приведена методика исследования реакции водонасыщенного коллектора на разные типы воздействия – техногенные (взрывы и водоотбор), экзогенные (атмосферное давление, земные приливы) и эндогенные (прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений). На основе актуализации полевого материала по геолого-геофизическим и гидрогеологическим работам, проводимым в пределах площадок Семипалатинского испытательного полигона, выбраны участки, информативные для анализа последствий необратимых изменений состояния массива. Для оценки фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора сформированы базы данных высокоточных измерений вариаций уровня подземных вод, проводимых в природной и природно-техногенных геосистемах. Представлена методика оценки барометрической и приливной чувствительности водонасыщенного коллектора. Приливной анализ выполнен по полусуточной волне лунного типа M_2 , которая наиболее устойчиво проявляется в амплитудных спектрах уровня подземных вод и смещения грунта.

Для анализа режимов деформирования водонасыщенного коллектора привлечены результаты регистрации гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и промышленных взрывов, производимых при разработке железорудных месторождений. Пункты наблюдений оборудованы аппаратурно-измерительными комплексами, которые позволяют осуществлять синхронные сейсмические, гидрогеологические и барометрические измерения. Для типизации гидрогеологических откликов от землетрясений использована методика анализа экспериментальных данных в разных диапазонах частот и оценка амплитудного фактора.

Для обработки данных, полученных при проведении промышленных взрывов, предложено определять амплитудно-частотную характеристику системы «пласт-скважина» и функции когерентности между сейсмическими и гидрогеологическими данными, зарегистрированными в двух пунктах одновременно. Разработанный методический подход позволяет рассматривать вариации уровня и давления в системе «пласт-скважина» в качестве индикатора изменения свойств водонасыщенного коллектора и выделять гидрогеологические эффекты, скрытые при использовании традиционных способов измерений.

В главе 3 представлены геолого-структурные и гидрогеологические условия площадок исследований, которые характеризуются высокой степенью изученности. В пределах площадок Семипалатинского испытательного полигона детально описаны разломы различных порядков, ограничивающие блоки соответствующих рангов и определяющие гидрогеологические условия территории. Сложные гидрогеологические условия разрабатываемых железорудных месторождений обусловлены литолого-фациальной неоднородностью разреза, зонами тектонической и техногенной трещиноватости пород. Территория геофизической обсерватории «Михнево» отличается естественным режимом подземных вод, слабо подверженным техногенному воздействию. Водовмещающие коллекторы природно-техногенной и природной геосистем характеризуются значительной неоднородностью физико-механических и фильтрационных характеристик по площади и в разрезе.

В главе 4 описаны последствия крупномасштабного техногенного воздействия на массив горных пород, полученные по результатам комплексных геолого-геофизических и гидрогеологических работ, выполненных на территории Семипалатинского испытательного полигона с участием автора. Для анализа изменений эффективных характеристик водонасыщенного коллектора проведено сопоставление результатов исследований, выполненных в два этапа – до и после проведения крупномасштабного взрыва. В пределах горного массива отмечено разрушение скальных выступов, гребней, увеличение площадей распространения осыпей и образование новых. Неоднократное проведение взрывов в горизонтальных горных выработках – штольнях способствовало повышению проницаемости массива за счет подновления естественной трещиноватости и развития техногенной. Дренирование массива выработками и искусственно-ослабленными зонами предопределило нарушенность гидрогеодинамической обстановки. Подобные изменения состояния массива горных пород и гидрогеологической ситуации прослежены в равнинной местности при проведении крупномасштабных взрывов в боевых скважинах. Поствзрывные деформации дневной поверхности представлены вспучиванием грунта, провальными понижениями, протяженными зияющими трещинами. В эпицентральной зоне крупномасштабного взрыва и в зонах влияния регионального разлома по данным сейсмопрофилирования установлено увеличение глубины залегания структурной границы раздела выветрелых и относительно монолитных пород до 10 м и более, которое подтверждено результатами геофизических исследований, проведенных в скважинах. В пределах выбранных участков детально рассмотрены динамические и постдинамические изменения режима подземных вод, связанные с проведением крупномасштабных взрывов, наиболее значимо выраженные не только в эпицентральной зоне, но и в зоне влияния регионального разлома.

В главе 5 приведены результаты изучения влияния квазистационарных и периодических факторов на водонасыщенный коллектор, полученные по данным высокоточного мониторинга уровня подземных вод, проводимого в пределах природной и природно-техногенной геосистем. На основе приливного анализа выполнена оценка проницаемости и водопроводимости водонасыщенного коллектора в естественных и техногенно-нарушенных условиях. В естественных условиях для территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», расположенной вне зоны активного техногенеза, описаны гидрогеологические эффекты, вызванные прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений, и определены основные параметры – максимальная скорость смещения грунта и амплитуда вариаций уровней подземных вод. Анализ нормированных спектров скорости смещения грунта и уровня подземных вод подтвердил корректность использованного подхода для типизации гидрогеологических откликов в разных диапазонах частот и выделения постсейсмических откликов. В природно-техногенных условиях в пределах разрабатываемых железорудных месторождений сформирована база данных синхронных сейсмических, гидрогеологических и барометрических измерений, которая использована для исследования реакции системы «пласт-скважина» на проведение массовых взрывов. По результатам обработки экспериментальных данных отмечено, что гидрогеологический отклик, зарегистрированный датчиками в скважинах, опережает время вступления сейсмических волн от взрывов на записях сейсмометров, расположенных на поверхности. Установлена степенная зависимость амплитуды вариаций зарегистрированных гидрогеологических откликов от максимальной скорости смещения грунта, связанной с прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов. Определено различие амплитудно-частотных параметров водонасыщенного коллектора порового и трещинно-пластового типов.

В главе 6 описаны основные закономерности деформирования водонасыщенного коллектора при динамическом воздействии. Квазистационарные факторы – земные приливы и атмосферное давление, – определяют пороупругое деформирование коллектора. Под влиянием периодических факторов – землетрясений и промышленных взрывов, – могут проявиться квазиупругий, квазиобратимый и необратимый режимы деформирования водонасыщенного коллектора. Сравнительный анализ техногенно нарушенного режима подземных вод после крупномасштабных взрывов позволяет выделять области максимального снижения уровня и определять размеры сформированных депрессионных воронок. Полученные значения вариаций давления при проведении крупномасштабных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне соотносятся с опубликованными данными по полигону Амчитка. Формирование зон

наведенной трещиноватости и подновление существующих систем при крупномасштабных взрывах контролируют условия перераспределения подземного потока, которое выражается в региональном тренде снижения уровня подземных вод относительно первоначального положения. Отмечено, что гидрогеодинамические процессы, прослеженные при проведении крупномасштабных взрывов, подобны гидрогеологическим эффектам, зарегистрированным в эпицентральной зоне катастрофических землетрясений. Степенные зависимости амплитуд снижения уровня подземных вод от рассчитанной массовой скорости смещения грунта при крупномасштабных взрывах и землетрясении имеют близкие значения и характеризуются относительно высоким коэффициентом детерминации. Гидрогеологические отклики в виде косейсмических и постсейсмических эффектов могут быть связаны с динамическим деформированием водонасыщенного коллектора и вариациями порового давления в системе «пласт-скважина» при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений и проведением массовых взрывов при разработке железорудных месторождений соответственно. 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. Феноменологическая модель реакции водонасыщенного коллектора на крупномасштабные взрывы и землетрясения основана на анализе экспериментальных и опубликованных данных по гидрогеологическим откликам на воздействия различной интенсивности и новых экспериментальных материалов, полученных при проведении прецизионного мониторинга на территории геофизической обсерватории «Михнево» и в промышленном регионе, в зоне разрабатываемых железорудных месторождений.

В **заключении** приводятся основные результаты, полученные в ходе исследований, которые свидетельствуют о том, что поставленные научные задачи успешно решены, заявленная цель исследования достигнута. Вместе с тем отмечены перспективные направления продолжения исследований, связанные с рассмотрением отмеченных гидрогеологических эффектов в качестве возможных триггеров активизации 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.

Диссертационная работа и автореферат характеризуются четкой структурой и последовательностью изложения, в полной мере отвечают целям и задачам исследования. Содержание автореферата соответствует содержанию текста диссертации. Диссертация и автореферат написаны лично автором, ссылки на работы других авторов оформлены

корректно.

Защищаемые научные результаты в полной мере изложены в 26 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 18 публикациях, проиндексированных в международных базах научных знаний Scopus, Web of Science, и одной монографии (в соавторстве), а также широко представлены в других научных изданиях, на международных и российских научно-практических конференциях (более 50 докладов).

Замечания:

1. Диссертант при описании зависимости между переменными, в частности, амплитуды давления в системе «пласт-скважина» от максимальной скорости смещения грунта в автореферате на стр. 23, 31 и в соответствующих разделах диссертационной работы использует термин «коэффициент корреляции», но в данном случае правильнее использовать термин «коэффициент детерминации».

2. В ряде случаев диссертант допускает технические ошибки. Например, вместо использования термина приливной фактор (или приливная чувствительность уровня воды), который подразумевает отношение амплитуды приливного отклика уровня воды к амплитуде приливных изменений объемной деформации грунта, в автореферате на стр. 22, 27 и в диссертационной работе на стр. 50, 156, 157 применяет термин «амплитудный фактор». Напротив, амплитудный фактор, как указано на стр. 66 диссертации (или коэффициент усиления), рассчитывается при делении спектра уровня воды на спектр скорости грунта на определенных ранее частотах, соответствующих синхронизации пиковых значений.

3. В автореферате и диссертационной работе, например, на стр. 53, 58 и далее автор указывает на «создание базы данных по результатам прецизионного мониторинга уровня подземных вод», ее использование, но отсутствует информация о регистрации или оформлении свидетельства на базу данных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Указанные замечания не снижают ценности полученных автором результатов. Диссертация Э.М. Горбуновой является завершенной научно-квалификационной работой, которую можно квалифицировать как крупное научное достижение. Выполненные исследования позволили внести значительный вклад в решение проблемы создания методов дистанционного контроля фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора, направленных на контроль и оценку негативных последствий техногенного воздействия на недра.

Результаты диссертации могут быть использованы специалистами МЧС России, Федерального агентства по недропользованию РФ, горнодобывающих предприятий, сотрудниками академических институтов.

Диссертация «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 заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.6. – Гидрогеология, 16.9. – Геофизика.

Диссертация, автореферат и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании лаборатории «Геодинамики, георесурсов, георисков и геоэкологии», направление исследований которой соответствует тематике диссертации. Отзыв утвержден в качестве официального отзыва ведущей организации на заседании Ученого совета Геологического направления ИО РАН «26» мая 2022 г., протокол № 1.

Научный руководитель

Геологического направления ИО РАН
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН
Лобковский Леопольд Исаевич
(тел.: +7 (499) 124-59-96; адрес: 117997, Москва, Нахимовский проспект, дом 36;
e-mail: llobkovsky@ocean.ru)

Старший научный сотрудник ИО РАН

к.ф.-м.н. Крылов Артём Александрович
(тел.: +7 (909) 978-26-79; адрес: 117997, Москва, Нахимовский проспект, дом 36;
e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru)

Я, Леопольд Исаевич Лобковский, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Я, Артём Александрович Крылов, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Подписи Л.И. Лобковского и А.А. Крылова удостоверяю

Верно:

Зав. канцелярией ИО РАН

