

*На правах рукописи*

**Петухова София Максимовна**

**ВАРИАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНОГО  
КОЛЛЕКТОРА ПРИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ И СЕЙСМИЧЕСКОМ  
ВОЗДЕЙСТВИИ (ПО ДАННЫМ ГФО «МИХНЕВО»)**

**Специальность 1.6.9 «Геофизика»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2023

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского Российской академии наук» (ИДГ РАН)

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук

**Горбунова Элла Михайловна**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор кафедры безопасности и экологии горного производства Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)

**Батугин Андриан Сергеевич**

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук» (ИФЗ РАН)

**Герке Кирилл Миронович**

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ).

Защита состоится «25» января 2024 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.059.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук» по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте [idg.chph.ras.ru](http://idg.chph.ras.ru).

Автореферат разослан

«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.059.01  
доктор физико-математических наук

**С.П. Соловьев**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Гидрогеологические отклики на экзогенное и эндогенное воздействие в условиях квазистационарного режима фильтрации могут рассматриваться в качестве индикатора динамического деформирования флюидонасыщенного коллектора и вариаций порового давления. Разнообразие регистрируемых гидрогеологических эффектов обусловлено разными режимами деформирования флюидонасыщенного коллектора и различиями в локальных геолого-структурных условиях. Значительная сложность заключается в разработке адекватных моделей, соответствующих различным механизмам реакции флюидонасыщенного коллектора на внешнее воздействие. Пороупругая реакция флюидонасыщенного коллектора на атмосферное давление и земные приливы проявляется в виде вариаций уровня подземных вод в длиннопериодном диапазоне, при прохождении сейсмических волн – в высокочастотной области. Необходимость разработки физических моделей реакции флюидонасыщенного коллектора на внешнее воздействие, а также дистанционных методов контроля массива горных пород определяет актуальность данной работы. Для мониторинга фильтрационных свойств массива может быть использован «невозмущающий» метод оценки вариаций проницаемости коллектора по фазовым характеристикам приливного отклика скважин. Применение такого метода к анализу реакции системы «пласт-скважина» на квазистационарные факторы (атмосферное давление и земные приливы) позволяет оценить фоновые вариации фильтрационных свойств пласта. А исследование гидрогеологических откликов на эпизодическое воздействие (удаленные катастрофические землетрясения) позволяет обнаружить возможное изменение структуры трещинно-порового пространства, которое может приводить к активизации природно-техногенных процессов. Использование прецизионного мониторинга уровня подземных вод в комплексе с развивающимися подходами и методами обработки экспериментальных данных позволяет выявить основные закономерности реакции флюидонасыщенного коллектора на квазистационарные факторы и сейсмическое воздействие.

**Целью работы** является определение основных закономерностей реакции флюидонасыщенного коллектора на квазистационарные факторы и сейсмическое воздействие и разработка модели реакции карбонатного коллектора на экзогенное и эндогенное воздействия.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие **задачи**:

- актуализация сведений о влиянии экзогенных и эндогенных факторов на состояние флюидонасыщенных коллекторов по данным высокоточного гидрогеологического мониторинга;

- анализ методик, используемых для оценки фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов в массиве *in situ*;

- определение реакции неравномерно трещиноватого карбонатного коллектора на квазистационарные факторы – атмосферное давление и земные приливы по данным геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево»);

- исследование гидрогеологических откликов, зарегистрированных на территории ГФО «Михнево», при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений;

- моделирование реакции карбонатного коллектора на сейсмическое воздействие.

**Научная новизна и теоретическая значимость** представленной работы заключается в:

- создании комплекса методов обработки гидрогеологических и барометрических данных, полученных на территории ГФО «Михнево» для оценки фильтрационных параметров флюидонасыщенных коллекторов;

- адаптации методик, применяемых для обработки сейсмических данных, к анализу результатов гидрогеологического мониторинга;

- установлении закономерностей гидрогеологических откликов неравномерно трещиноватого карбонатного коллектора на квазистационарные факторы (земные приливы, атмосферное давление) и сейсмическое воздействие в напорных и слабонапорных условиях с учетом различий структурных и фильтрационных параметров;

- выявлении основных критериев, позволяющих прогнозировать реакцию коллектора на квазистационарное и сейсмическое воздействие;

- разработке модели реакции карбонатного коллектора на квазистационарное и сейсмическое воздействие.

**Практическая значимость** заключается в определении диапазонов вариаций проницаемости карбонатного коллектора в недренируемых условиях под влиянием квазистационарных факторов по данным многолетних наблюдений на территории ГФО «Михнево». Сопоставление результатов теоретических расчетов, выполненных по сейсмическим данным, с экспериментальными измерениями вариаций порового давления, зарегистрированными при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений, позволяет определять коэффициенты нарушенности флюидонасыщенного коллектора. Полученные параметры свидетельствуют о пороупругом и неупругом деформировании неравномерно трещиноватого карбонатного коллектора; их рекомендуется учитывать при строительстве объектов повышенного уровня ответственности в сложных инженерно-геологических условиях. Зарегистрированные значения амплитуд косейсмических и постсейсмических эффектов на территории ГФО «Михнево» при сейсмическом воздействии

могут быть использованы для разработки методики прогнозной оценки вариаций давления в флюидонасыщенных коллекторах и относительной деформации.

Основные **методы исследования** направлены на оценку фильтрационных свойств водовмещающих пород по реакции коллектора на атмосферное давление и земные приливы, определение параметров гидрогеологических откликов при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений и моделирование реакции карбонатного коллектора на сейсмическое воздействие.

#### **Защищаемые положения:**

1. Создан комплекс методов обработки измерений сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров, позволяющий оперативно оценивать фильтрационные свойства водонасыщенного коллектора.

2. Долговременные вариации проницаемости карбонатного коллектора, определяемые на территории ГФО «Михнево» на протяжении более 10 лет, для каждого из двух разновозрастных водоносных горизонтов не превышают порядка величины средней проницаемости данного горизонта.

3. В платформенных условиях косейсмические эффекты при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений начинают проявляться в виде осцилляций порового давления при уровне относительной деформации карбонатного коллектора более  $7 \cdot 10^{-9}$ , сравнимой с деформацией от земных приливов.

4. Эмпирически установлен эффект постсейсмического увеличения порового давления карбонатного коллектора в напорных условиях при прохождении сейсмических волн с максимальным уровнем относительной деформации более  $2.6 \cdot 10^{-7}$ . Амплитуда увеличения порового давления определяется плотностью сейсмической энергии и зависит от локальных гидрогеологических условий и амплитудно-частотной характеристики системы «пласт-скважина».

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием апробированных измерительных методик, современными методами обработки больших массивов экспериментальных данных за многолетний период наблюдений 2010–2023 гг. на территории ГФО «Михнево» и сопоставлением полученных результатов с данными, опубликованными другими исследователями.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимал участие в формировании базы данных и обработке гидрогеологических и барометрических данных, полученных на территории ГФО «Михнево» за период наблюдений 2010–2023 гг. Соискателем лично на основе барометрического и приливного анализа вариаций уровня подземных вод определены фоновые параметры

флюидонасыщенного коллектора, исследовано влияние сейсмических волн от удаленных землетрясений на карбонатный коллектор. Результаты выполненных теоретических расчетов сопоставлены с экспериментально полученными данными. Предложена модель реакции карбонатного коллектора на квазистационарное и сейсмическое воздействие, построенная по данным ГФО «Михнево».

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на 8 российских и международных конференциях:

6-ая Международная научная конференция - школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2020), 64-ая Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2021), международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2021), VIII научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (Петропавловск-Камчатский, 2021), XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург, 2022), XIV Международная конференция молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях» (Бишкек, 2022), 6-ая Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 2022).

По теме диссертации автором опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 5 – в научных сборниках и трудах конференций.

**Объем и структура работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав, изложенных на 159 страницах, включая 77 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения и список литературы из 110 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. Э.М. Горбуновой за чуткое руководство и помощь в выполнении работы, д.ф.-м.н., проф. Г.Г. Кочаряну за поддержку и корректировку курса научного исследования, к.ф.-м.н. А.Н. Бесединой за содействие и помощь в разработке методического аппарата. Автор признателен д.ф.-м.н. Б.А. Иванову, д.ф.-м.н. В.М. Овчинникову, д.ф.-м.н. А.А. Спиваку и к.ф.-м.н. А.А. Остапчуку за консультирование и ценные замечания на заключительном этапе исследования. Автор благодарит всех коллег, сотрудников лаборатории «деформационных процессов в земной коре» ИДГ РАН за поддержку и участие в обсуждениях в ходе выполнения работы, инженера Л.Д. Годунову – за помощь при редакции текста.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, отражена научная новизна и теоретическая значимость, описана практическая значимость работы.

Для оценки фильтрационных свойств коллекторов применяют, как правило, стандартные методы геофизических исследований – откачки, нагнетания, трассерные исследования и т.д. Применение этого типа испытаний имеет как преимущества, так и недостатки. К последним можно отнести высокую стоимость проведения исследований, сложность проведения этих работ в труднодоступных районах, а также «дискретность» измерений. Данные методы не позволяют проследивать изменение фильтрационных свойств коллектора во времени.

С целью получения представительной информации о состоянии водоносных горизонтов наряду со стандартными методами применяют высокоточный мониторинг уровней подземных вод и атмосферного давления. Результаты непрерывных гидрогеологических и барометрических измерений могут быть использованы для оценки фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора *in situ* – по реакции системы «пласт-скважина» на квазистационарные факторы (влияние атмосферного давления и земных приливов) и сейсмическое воздействие.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору работ по теме исследования.

Теоретические основы реакции флюидонасыщенных коллекторов на сейсмическое воздействие и земные приливы представлены в статьях Н.Н. Cooper, J.D. Bredehoeft, P.A. Hsieh, E.E. Roeloffs, S. Rojstaczer и других. Многочисленные работы И.Г. Киссина, Г.С. Варганяна, В.О. Волейшо, Г.В. Куликова, Ф.И. Монахова, Д.Г. Осика и других отечественных ученых посвящены изучению взаимодействия флюидных потоков и геодинамических процессов. Существенный вклад в пионерские исследования гидрогеологических откликов при деформировании флюидонасыщенных коллекторов под влиянием атмосферного давления внесли В.Л. Барабанов, А.А. Любушин, А.Б. Манукин, Е.И. Попов и другие. Результаты прецизионного мониторинга вариаций уровня подземных вод при квазистационарном воздействии используются для определения фильтрационных параметров флюидонасыщенных коллекторов (Т.Т. Burbey, A. He, C. Turnadge, C.Y. Wang, M.-L. Doan и другие). Выделяемые косейсмические и постсейсмические эффекты соотносятся с различными режимами деформирования флюидонасыщенных коллекторов (Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, С.-Y. King, G. Lai, С.-Y.Liu, E. Shalev, T. Shibata и другие).

В сейсмоактивных регионах основное внимание уделяется анализу влияния землетрясений на состояние флюидонасыщенных коллекторов (С.У. Wang, М. Manga, N. Matsumoto, Y. Kitagawa, X. Sun, Z. Shi и другие). Изменение проницаемости прослежено в зонах влияния разломов при прохождении сейсмических волн от землетрясений (J.E. Elkhoury, E.E. Brodsky, D.C. Agnew, L. Xue, R. Yan, S. Zhang и другие). На основе ретроспективного анализа материалов выполняется разработка моделей и механизмов деформирования флюидонасыщенного коллектора (С.У Wang, М. Manga, Y. Xing и другие), а также поиск и изучение предвестников землетрясений (Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, Н.С. Hwang, С.-У. King, Н.А. Lee и другие). Стоит отметить исследования, связанные с численным моделированием напряженно-деформированного состояния коллекторов при разработке месторождений углеводородов (А.А. Быков, И.Н. Завьялов, Н.А. Завьялова, О.Я. Извеков, А.В. Конюхов и другие).

Вариации уровня подземных вод в недренируемых условиях рассматриваются в качестве индикатора динамического деформирования флюидонасыщенного коллектора и вариаций порового давления при воздействии экзогенных, эндогенных и техногенных факторов. Основным свойством флюидонасыщенного коллектора является проницаемость, которая зависит от литолого-фациального состава пород и определяет не только условия движения флюидов, но и реакцию коллектора на динамическое воздействие. Разнообразие гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясений, свидетельствует о разных режимах деформирования флюидонасыщенных коллекторов.

В основе пороупругой модели лежит зависимость между режимом деформирования флюидонасыщенного коллектора и вариациями порового давления (уровня подземных вод). Механизмы изменений фильтрационных свойств коллекторов при сейсмическом воздействии различаются. В ближней зоне землетрясений проявляются преимущественно два механизма – разжижения и дилатансии (трещинообразования). В промежуточной и дальней зонах землетрясений в качестве основных механизмов изменения проницаемости рассматриваются кольматация-декольматация трещин в пласте и околоскважинном пространстве (скин-эффект) коллоидными частицами; динамические воздействия (вибрация); дегазация; гидрогеохимические процессы, такие как осаждение минералов, растворение и другие. В одной из последних работ представлен новый механизм, объясняющий динамические изменения проницаемости, который зависит от азимутальной направленности сети гидравлически проводящих трещин.

Анализ опубликованных работ показал, что при разработке теоретических основ реакции флюидонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие необходимо

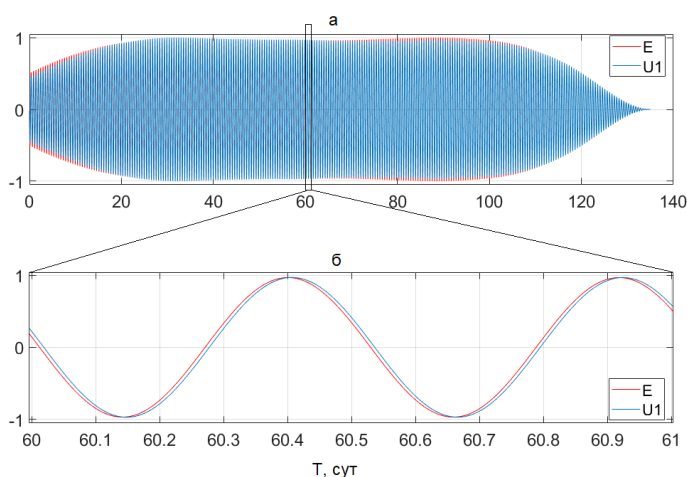


рассматривать более сложные механизмы, учитывающие различие типов и фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов.

**Вторая глава** работы посвящена описанию методов обработки экспериментальных данных, полученных на территории ГФО «Михнево» за период 01.01.2010–24.03.2023 гг. с использованием разработанного программного комплекса (Свидетельство, 2023).

В состав аппаратурно-измерительного комплекса входят две наблюдательные скважины, оборудованные прецизионными датчиками уровня LMP-308i с частотой опроса 1 Гц. В скважине 1, пробуренной в декабре 2006 г., вскрыт нижний напорный горизонт в интервале 92–115 м. В скважине 2, пройденной в марте 2013 г., – верхний слабонапорный в интервале 44.0–56.2 м. С 2010 по 2019 гг. регистрация вариаций атмосферного давления осуществлялась с использованием метеостанции Vantage Pro, с 2020 по 2023 гг. – датчиком Keller PAA-33x с частотой опроса 1 Гц. Сейсмические данные с 2010 по 2019 гг. получены по сеймопункту ГФО «Михнево» (MHV), с 2020 г. – по станции «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН (OBN). Исходная частота опроса 100 Гц приведена к 1 Гц для сопоставления с результатами гидрогеологических и барометрических измерений. Данные теоретического смещения грунта и объемной приливной деформации рассчитаны в программе ETERNA 3.0.

На подготовительном этапе обработки произведена очистка исходных рядов от артефактов, удалены единичные и длительные выбросы значений сигналов. Последующий анализ фоновых параметров флюидонасыщенного коллектора выполнен на основе сформированных непрерывных интервалов и длинных рядов гидрогеологических и барометрических данных. По реакции коллектора на влияние атмосферного давления оценивается изменение коэффициента барометрической эффективности ( $BE$ ), пористости ( $n$ ), сжимаемости матрицы ( $C_M$ ). Приливной анализ использован для оценки фильтрационных свойств коллектора. Данный метод основан на определении фазового запаздывания между приливной волной  $M_2$ , выделенной в теоретическом смещении грунта и уровне подземных вод (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Полусуточные приливные волны  $M_2$  с периодом 12.42 ч, выделенные в теоретическом смещении грунта ( $E$ ) и в уровне подземных вод ( $U_1$ ), нормированные к максимальным значениям, за период 14.02.2020–28.06.2020 (а), врезка для суток 13.04.2020 (б)*

Водопроницаемость ( $T$ ) определяется по фазовому сдвигу ( $\eta$ ). Связь этих параметров представлена в уравнениях (Hsieh et al., 1987):

$$\eta = -tg^{-1}\left(\frac{F}{E}\right), \quad (1)$$

$$E \approx 1 - \frac{\omega r_c^2}{2T} Kei(\alpha_w), \quad (2)$$

$$F \approx \frac{\omega r_c^2}{2T} Ker(\alpha_w), \quad (3)$$

где  $\omega=2\pi/\tau$  – частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $\tau$  – период колебаний, с;  $r_c$  – радиус обсадной колонны, м;  $r_w$  – радиус скважины, м;  $T$  – водопроницаемость,  $m^2/сут$ ;  $Ker(\alpha_w)$  и  $Kei(\alpha_w)$  – функции Кельвина нулевого порядка;  $\alpha_w=(\omega S/T)^{1/2} \cdot r_w$ ;  $S$  – коэффициент упругой водоотдачи пласта.

Проницаемость коллектора ( $k$ ) рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{\mu}{\rho g d} T, \quad (4)$$

где  $T$  – водопроницаемость пород,  $m^2/сут$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости пласта;  $\rho$  – плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ;  $d$  – интервал обводненной части скважины, м.

При анализе откликов на сейсмическое воздействие используется плотность сейсмической энергии ( $e$ ) – параметр, который связывает магнитуду и эпицентрального расстояние (Wang, 2007):

$$M = 2.7 + 0.69 \lg e + 2.1 \lg (R), \quad (5)$$

где  $R$  – эпицентрального расстояние, км;  $M$  – магнитуда.

На основе спектрального анализа гидрогеологических и сейсмических записей определены параметры гидрогеологических откликов, выделены косейсмические и постсейсмические эффекты. Для сравнительного анализа откликов флюидонасыщенного коллектора на эпизодическое воздействие экзогенных и эндогенных факторов с фоновыми параметрами объекта исследований – геолого-геофизической средой (сейсмическими, барометрическими и гидрогеологическими) впервые применялся вероятностный подход, который используется для характеристики сейсмического шума (McNamara, Buland, 2004).

Для оценки и определения упругих коэффициентов, соответствующих объемной и девиаторной деформации, возникающей при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений, выполняется моделирование теоретического гидрогеологического отклика (Shalev et al., 2016) на землетрясение в соответствии с:

$$\Delta p_f = BK_u \frac{1 - 2\nu_u}{1 - \nu_u} \frac{v_R}{V_P} + N \frac{1}{2} \frac{v_T}{V_S}, \quad (6)$$

где коэффициент  $BK_u \frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}$  отражает упругие свойства среды в недренируемых условиях;  $B$  – коэффициент Скемптона;  $K_u$  – объемный модуль;  $\nu_u$  – коэффициент Пуассона;  $N$  определяет девиаторную деформацию;  $\nu_T$  – трансверсальная скорость,  $V_P$  – скорость продольной волны,  $V_S$  – скорость поперечной волны. Оценку можно также производить для временных интервалов, содержащих фазу прохождения поверхностных волн, используя значения скорости волн Лява и Рэлея.

Теоретическое изменение порового давления сопоставляется с зарегистрированным откликом системы «пласт-скважина». Применяется автоматизированный подбор значений параметров (упругих коэффициентов) с определением коэффициента детерминации для каждого набора параметров. В качестве итоговых значений принимается набор параметров, при котором получен наиболее высокий коэффициент детерминации. Далее по рассчитанным значениям упругих коэффициентов определяется коэффициент нарушенности среды  $\alpha_D$ , который может соответствовать концентрации трещин в породе.

Разработанный комплекс методов обработки экспериментальных данных используется для оперативной оценки фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора. Алгоритм программы приведен в Приложении А. Представленные в главе 2 результаты подтверждают первое защищаемое положение.

**Третья глава** диссертации посвящена результатам исследования режима деформирования флюидонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод, проводимого на территории ГФО «Михнево».

Водовмещающие породы представлены известняками трещиноватыми и неравномерно трещиноватыми, доломитами, мергелями с подчиненными прослоями глин. По данным многолетних режимных измерений атмосферного давления, уровней напорного и слабонапорного водоносных горизонтов определены вариации коэффициентов барометрической эффективности, сжимаемости матрицы и пористости.

Нижний напорный горизонт гидравлически связан с долинным комплексом р. Оки и характеризуется неравномерным и растянутым питанием в течение годового цикла. Прослежен общий тренд подъема уровня и увеличения напора. Амплитуда весенних вариаций напорного алексинско-протвинского водоносного горизонта нижнего карбона зависит от гидрологического режима реки Оки и изменяется от 1.1 до 3.1 м (рисунок 2). Влияние граничных условий – гидрологического режима реки Оки на нижний водоносный горизонт проявляется с запаздыванием до 2 месяцев (данные по гидропосту г. Серпухов получены из фондов отдела гидрологии Центрального Управления гидрометслужбы РФ).

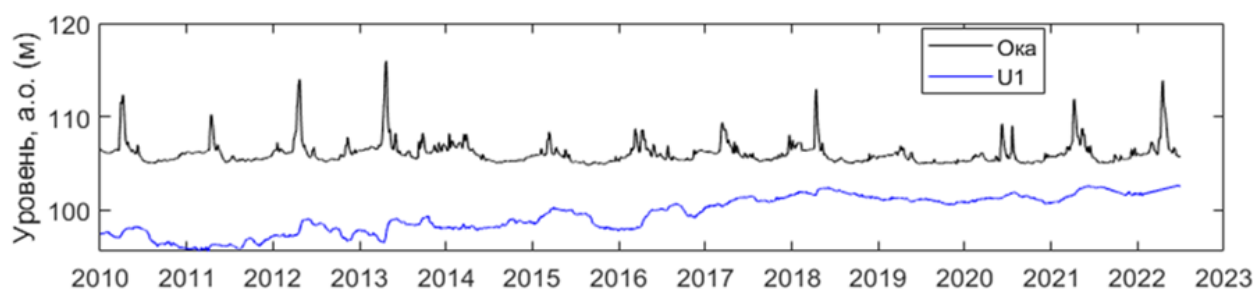


Рисунок 2 – Диаграммы вариаций уровня р. Оки и напорного водоносного горизонта

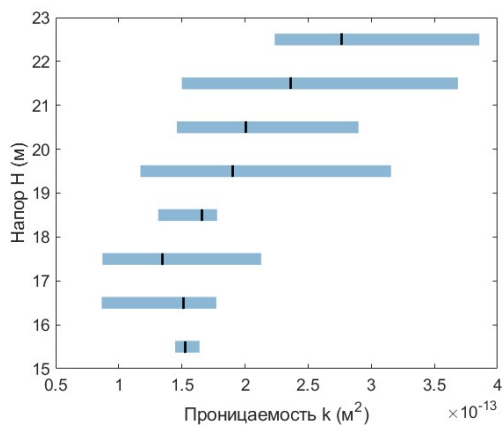
Режим слабонапорного каширского горизонта среднего карбона техногенно нарушен из-за эксплуатации скважинами и колодцами. В вариациях уровня прослеживается годовая цикличность в виде интенсивного подъема уровня в паводок (весенний период) с амплитудами до 1.9–2.3 м. При определении фильтрационных параметров карбонатного коллектора – водопроницаемости и проницаемости учтено влияние внешних – естественных и техногенных факторов. Из расчетных рядов фазового сдвига исключены интервалы с нарушением квазистационарного режима фильтрации, при увеличении вариаций уровня более  $\pm 5$  см/сут. Оценка проницаемости выполнена для отдельных интервалов, в пределах которых в уровне подземных вод устойчиво выделяется приливная волна  $M_2$ . Результаты определения фильтрационных свойств коллектора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Фильтрационные параметры карбонатного коллектора

Год	Месяц	$\eta^\circ$	T, м <sup>2</sup> /сут	$k \cdot 10^{-13}$ , м <sup>2</sup>	Месяц	$\eta^\circ$	T, м <sup>2</sup> /сут	$k \cdot 10^{-13}$ , м <sup>2</sup>	
Напорный водоносный горизонт					Слабонапорный водоносный горизонт				
2011	02 - 06	-3.3...-1.3	2.6-7.6	5.1-14					
2012	05 - 08	-2.4...-1.5	3.8-6.1	7.4-12					
2013	06 - 08	-5.5...-2.9	1.5-3.1	2.9-6.0					
2014	05 - 07	-7.5...-2.7	1.1-3.3	2.0-6.3					
2015	05 - 08	-6.2...-4.5	1.3-1.9	2.5-3.7	07 - 09	-11...-2.5	0.8 – 4.0	1.6 – 7.9	
2016	05 - 09	-7.6...-4.9	1.0-1.7	2.0-3.4	07 - 09	-9.5...-2.0	0.9 – 5.0	1.8 – 9.9	
2017	04 – 08	-6.0...-7.1	1.1-1.4	2.2-2.6					
2018	05 - 09	-6.8...-5.8	1.4-1.2	2.3-2.7					
2019	03 - 08	-10.2...-7.6	1.1-1.2	1.5-2.0	07 - 08	-10.7...-2.0	0.9 – 5.0	1.8 – 9.9	
2020	05 - 09	-10.4...-3.7	1.2-2.3	1.4-4.5	06 - 08	-4.0...-2.6	3.0 – 4.0	5.9 – 7.9	
2021	05 - 09	-6.8...-5.0	1.2-1.7	2.3-3.2					
2022	07 - 09	-7.6...-1.2	1.0-7.7	1.3-12					

Для одних и тех же интервалов, представленных в таблице 1, водопроницаемость карбонатного коллектора в верхней части разреза изменяется от 0.8 до 5.0 м<sup>2</sup>/сут, в нижней части разреза – от 1.0 до 2.3 м<sup>2</sup>/сут.

Для значений проницаемости нижнего горизонта прослеживается зависимость от величины напора (глубины залегания уровня), которая характеризуется относительно невысоким коэффициентом корреляции 0.53 (рисунок 3). Для верхнего горизонта подобная зависимость не установлена.



*Рисунок 3 – Диапазоны вариаций проницаемости в зависимости от напора нижнего горизонта (засечками обозначены значения медиан для каждого диапазона)*

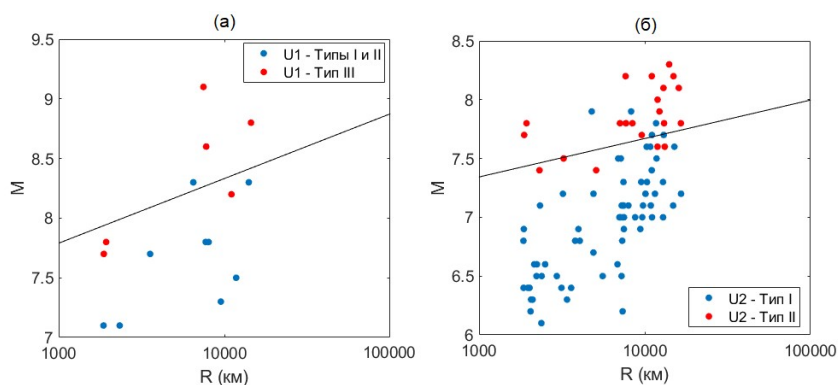
Для сопоставления водопроницаемости коллектора в напорных и слабонапорных условиях, определенной дистанционным методом, с результатами расчета этого параметра, полученного по данным откачки, построены гистограммы распределения и график плотности распределения вероятностей фазового сдвига. Для нижнего горизонта среднее значение водопроницаемости составляет 1.5 м<sup>2</sup>/сут при фазовом сдвиге, равном -6°, для верхнего горизонта – 11 м<sup>2</sup>/сут при фазовом сдвиге -0.2° и соответствует данным, полученным по результатам пробных откачек. Фильтрационные параметры нижнего напорного водоносного горизонта имеют более низкие значения по сравнению с верхним слабонапорным водоносным горизонтом.

Апробация разработанного программного комплекса выполнялась на данных, полученных в платформенных условиях на территории ГФО «Михнево». Полученные результаты подтверждают второе защищаемое положение.

За период наблюдений 01.01.2010 – 24.03.2023 гг. в двух наблюдательных скважинах, расположенных на территории ГФО «Михнево», зарегистрировано 15 гидрогеологических откликов на удаленные землетрясения в нижнем напорном горизонте и 90 откликов в верхнем слабонапорном горизонте. Реакция флюидонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений в напорных и слабонапорных условиях различается. Амплитуды вариаций порового давления при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений в верхнем слабонапорном горизонте выше, чем в нижнем напорном горизонте. Отмеченные гидрогеологические эффекты преимущественно сопряжены

с группой поверхностных волн, которые вносят основной вклад в состав сейсмических волн от удаленных землетрясений. Основная часть откликов проявляется в виде вариаций давления (осцилляций) с амплитудами 20–1447 Па, среди которых выделяются 2 типа: с узким (тип I) и широким (тип II) диапазонами амплитудно-частотных характеристик (Горбунова, 2022). К типу III отнесены постсейсмические эффекты, которые зарегистрированы в виде увеличения порового давления в напорном горизонте на 18–35 Па при 6 землетрясениях.

Данные по типизации гидрогеологических откликов использованы при анализе реакции карбонатного коллектора на сейсмическое воздействие с учетом эпицентрального расстояния ( $R$ ) и магнитуды землетрясения ( $M$ ). Была выполнена бинарная классификация зависимости  $M$ - $R$  по типам гидрогеологических откликов с использованием метода опорных векторов. Для напорного горизонта выделенная зависимость  $M=0.54R+6.16$  соответствует разделению области проявления косейсмических откликов (типы I и II) от откликов с постсейсмическими эффектами (тип III) (рисунок 4а). Постсейсмические отклики напорного горизонта установлены на эпицентральных расстояниях 1873–1934 км и 7467–14464 км от землетрясений с магнитудами 7.7–7.8 и  $\geq 8.2$  (приложение Б). Разделение гидрогеологических откликов слабонапорного горизонта I и II типов соответствует зависимости  $M=0.33R+6.36$ . Отклики II типа отмечены на эпицентральных расстояниях 1873–16507 км от землетрясений с магнитудами  $\geq 7.4$  (рисунок 4б).



*Рисунок 4 – Классификация по типам гидрогеологических откликов в нижнем напорном (а) и верхнем слабонапорном горизонтах (б) с учетом магнитуды землетрясений и эпицентрального расстояния за период 2010–2023 гг.*

Двойное землетрясение, которое произошло в Турции 6 февраля 2023 г. с магнитудами 7.8 и 7.7, заслуживает отдельного рассмотрения, так как представляет собой уникальное событие и подчеркивает повышенный сейсмический риск во всем регионе. Расстояние между эпицентрами двух землетрясений, приуроченных к Восточно-Анатолийскому разлому и сопряженному с ним разлому Кардак, не превышало 100 км. Землетрясения мелкофокусные, глубина очагов составила 10–14.5 км. При прохождении сейсмических волн от первого землетрясения с максимальной скоростью 2.18 мм/с вариации порового давления в верхнем горизонте составили 554 Па, в нижнем горизонте – 59 Па. При сейсмическом воздействии второго землетрясения с максимальной скоростью 2.56 мм/с, произошедшего через 9 часов,

амплитуда вариаций порового давления в верхнем горизонте увеличилась до 1.4 гПа, в нижнем – до 78 Па (рисунок 5).

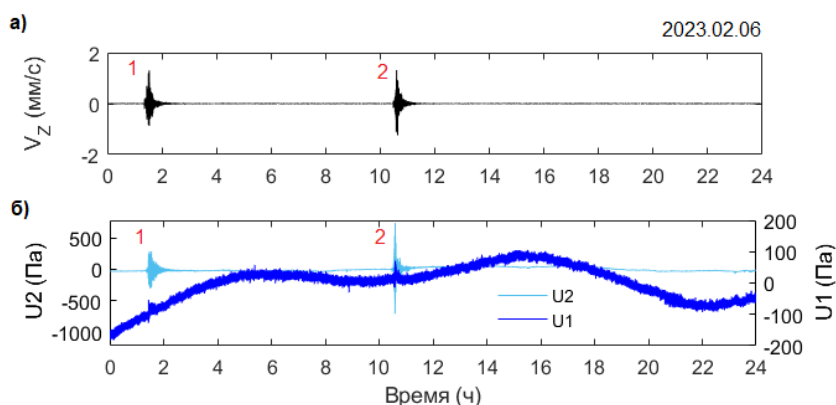


Рисунок 5 – Диаграммы скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (а) и вариаций порового давления (б) (верхний водоносный горизонт U2 – голубая линия, нижний U1 – синяя). Цифрами обозначены землетрясения в Турции 06.02.2023 (1 – 01:21:42 GMT; 2 – 10:28:46 GMT)

После первого землетрясения в нижнем напорном горизонте прослежено плавное постсейсмическое увеличение порового давления на 26 Па в течение 20 минут. После второго землетрясения постсейсмическое увеличение порового давления в нижнем горизонте на 18 Па проявилось кратковременно в течение 8 минут. В верхнем горизонте подобные постсейсмические эффекты не отмечены (рисунок 6).

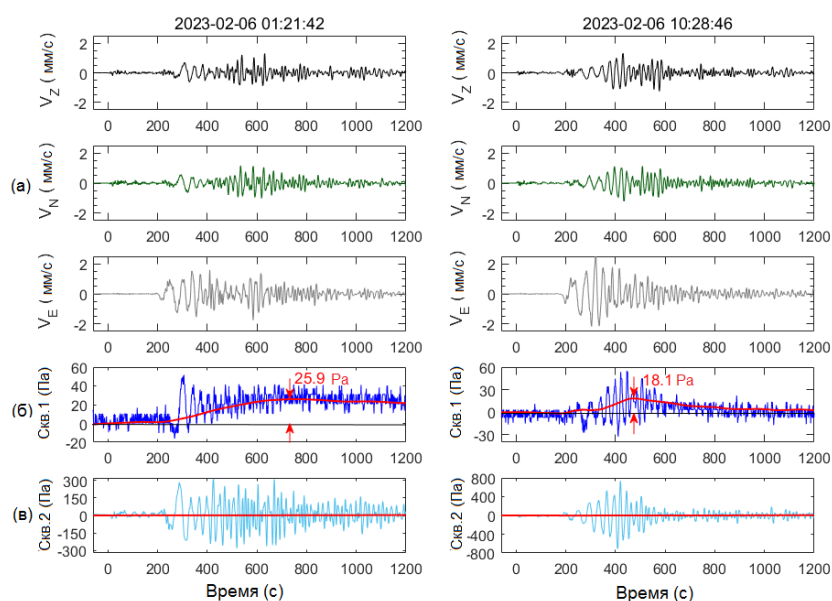


Рисунок 6 – Диаграммы скорости смещения грунта (Z, N, E – компоненты, три верхних ряда) (а), вариаций порового давления в напорном (б) и слабонапорном (в) горизонтах при прохождении сейсмических волн от землетрясений в Турции 06.02.2023 М 7.8 01:21:42 (слева) и 06.02.2023 М 7.7. 10:28:46 (справа) (начало отсчета 0 – время регистрации вступления сейсмических волн на станции OBN)

Для выбранных 2-часовых интервалов, связанных с землетрясениями 06.02.2023 г. в Турции, рассчитаны спектры плотности мощности (СПМ) скорости смещения грунта, которые вынесены на диаграмму (рисунок 7а). На моде СПМ скорости смещения грунта выделены 2 экстремума в окрестностях частот  $\sim 0.06\text{--}0.08$  Гц и  $0.2\text{--}0.5$  Гц, которые соответствуют первичным и вторичным микросейсам. Максимумы СПМ скорости смещения грунта от землетрясений определяются в диапазоне  $0.07\text{--}0.08$  Гц. Диаграмма СПМ слабонапорного водоносного горизонта (рисунок 7в) отличается более широким диапазоном 17 дБ между 10 и 90 перцентилями по сравнению с напорным водоносным горизонтом (рисунок 7б). Мода слабонапорного горизонта в диапазоне частот от 0.001 до 0.6 Гц изменяется от 15 до -12 дБ, мода напорного горизонта – от 10 до -5 дБ.

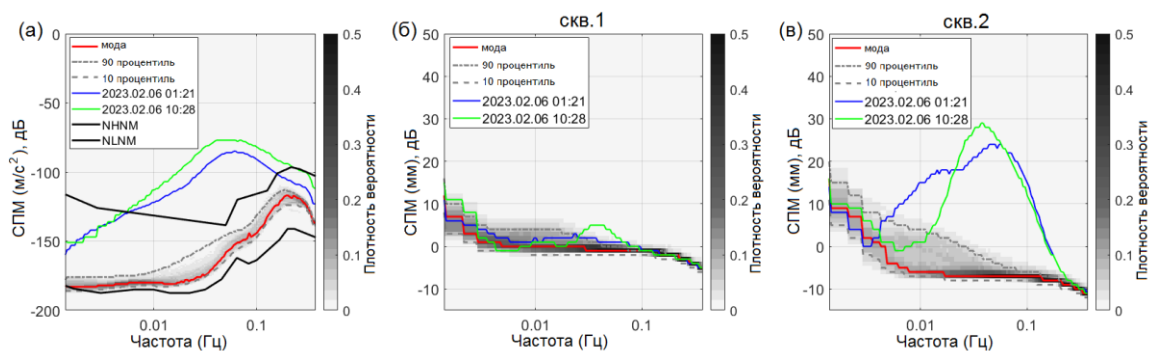


Рисунок 7 – Диаграммы плотности вероятности спектральной плотности мощности шума: скорости смещения грунта (а) (станция «Обнинск»), уровня напорного (б) и слабонапорного (в) водоносных горизонтов за период 01.12.2022–18.02.2023, совмещенные с СПМ землетрясений, произошедших в Турции 6 февраля 2023 г.

Экстремум СПМ напорного горизонта при первом землетрясении в Турции 6 февраля 2023 г. смещен в низкочастотную область 0.02–0.03 Гц относительно экстремума СПМ слабонапорного горизонта, прослеженного в диапазоне 0.06–0.07 Гц. Гидрогеологические отклики в напорном и слабонапорном горизонтах на второе землетрясение в Турции определяются в одном и том же частотном диапазоне СПМ.

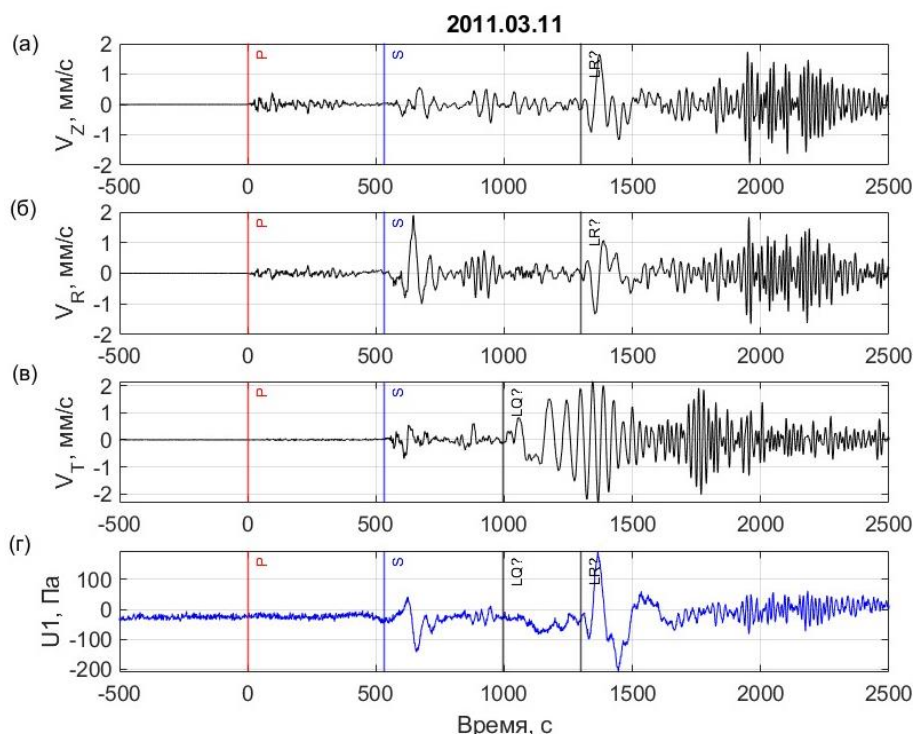
Амплитуда гидрогеологических откликов зависит от максимальных значений скорости смещения грунта, зарегистрированных на территории ГФО «Михнево» от удаленных землетрясений. Зависимость вариаций порового давления слабонапорного горизонта от скорости смещения грунта аппроксимируется степенной функцией с коэффициентом детерминации 0.9. В нижнем горизонте эта зависимость слабо выражена.

Использование высокоточного аппаратурно-измерительного комплекса на территории обсерватории «Михнево» в асейсмичном регионе позволило зарегистрировать реакцию флюидонасыщенного коллектора на прохождение атмосферного фронта от катастрофического извержения вулкана Тонга (15.01.2022 г.). Максимальная амплитуда вариаций атмосферного давления составила 3 гПа, амплитуда гидрогеологических откликов слабонапорного горизонта – 245 Па, напорного – 157 Па. Верхний слабонапорный водоносный горизонт более чувствителен к проходящим атмосферным фронтам по сравнению с нижележающим напорным водоносным горизонтом, так как характеризуется относительно высокой барометрической эффективностью. Результаты синхронных измерений гидрогеологических откликов на прохождение атмосферных возмущений, вызванных извержением вулкана Тонга, полученные в асейсмичном регионе на территории ГФО «Михнево», дополняют мировую базу данных по взаимодействию геосфер.

**Четвертая глава** работы посвящена исследованию основных закономерностей динамики деформирования флюидонасыщенного коллектора на примере ГФО «Михнево». Полученные экспериментальные данные при регистрации гидрогеологических откликов от удаленных землетрясений использованы для оценки относительной деформации коллектора. В



слабонапорном водоносном горизонте, приуроченном к неравномерно трещиноватому коллектору, осцилляции порового давления отмечены при относительной деформации более  $7 \cdot 10^{-9}$ , сопоставимой с деформациями, рассчитанными от земных приливов ( $\varepsilon_v$ ). При относительной деформации коллектора от  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $2.6 \cdot 10^{-7}$  вариации порового давления прослежены не только в слабонапорном, но и в напорном горизонте, получающем преимущественное распространение в слаботрещиноватом коллекторе. Постсейсмические эффекты в виде увеличения порового давления установлены в слаботрещиноватом коллекторе, к которому приурочен напорный горизонт, для 6 землетрясений при относительной деформации более  $2.6 \cdot 10^{-7}$  и плотности сейсмической энергии более  $4 \cdot 10^{-5}$  Дж/м<sup>3</sup>. Экстремумы гидрогеологических откликов могут быть приурочены как к прохождению поперечной S-волны, так и к группе поверхностных волн (рисунок 8).



*Рисунок 8 – Сейсмограммы по вертикальной (а), радиальной (б), трансверсальной (в) компонентам и вариации порового давления в слаботрещиноватом коллекторе (г) при землетрясении Тохоку, Япония 11.03.2011 М 9.1 (начало отсчета 0 – время регистрации вступления сейсмических волн на станции OBN)*

По спектрально-временным характеристикам и структуре волнового поля вариации порового давления в неравномерно трещиноватом и слаботрещиноватом коллекторе соответствуют записи скорости смещения грунта при землетрясениях. Необходимо отметить, что в слабонапорном горизонте прослежены только динамические вариации порового давления, которые соответствуют пороупругой реакции неравномерно трещиноватого коллектора. В напорном водоносном горизонте установлено постсейсмическое увеличение порового давления, которое свидетельствует о неупругом деформировании слаботрещиноватого карбонатного коллектора.

При исследовании влияния удаленных землетрясений на фильтрационные свойства карбонатного коллектора учитываются фоновые вариации основных параметров, которые

определены в главе 3. По данным многолетнего дистанционного мониторинга, проводимого на территории ГФО «Михнево», фильтрационные свойства нижнего напорного горизонта, развитого в пределах слаботрециноватого коллектора, изменяются от слабоводопроницаемого к водопроницаемому (рисунок 9).

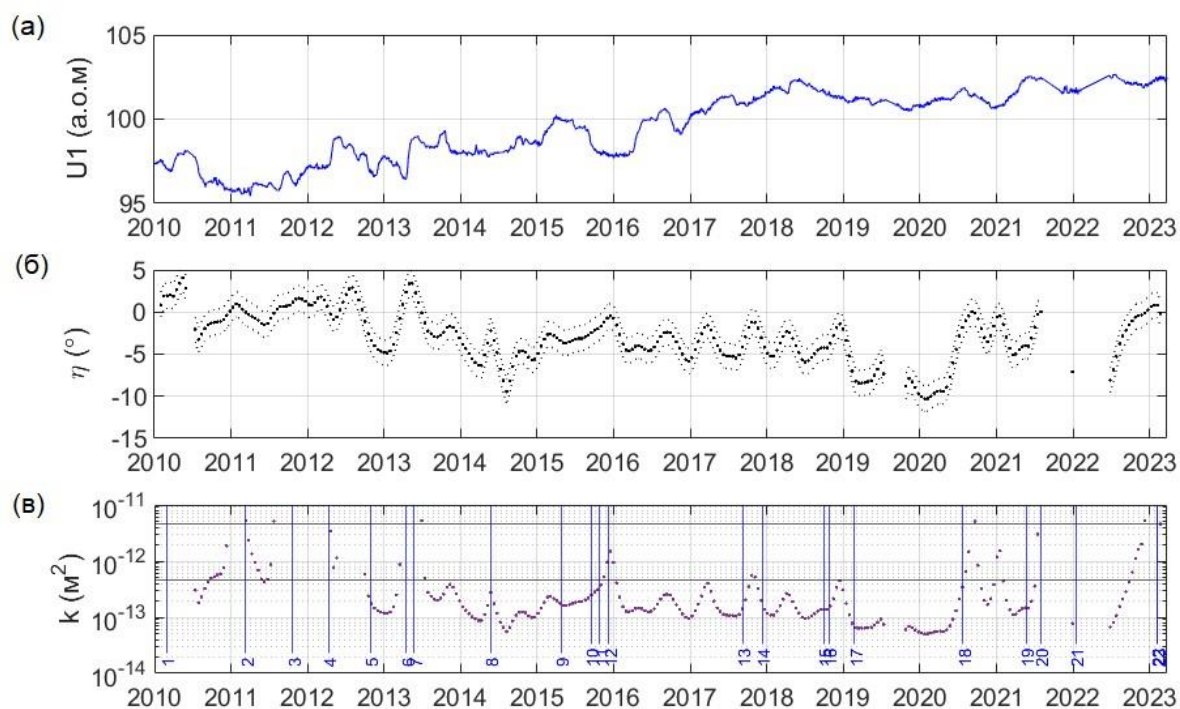


Рисунок 9 – Диаграммы вариаций уровня (а), фазового сдвига (б) и проницаемости (в) напорного горизонта (б – пунктиром показана погрешность; в - горизонтальными линиями обозначены границы перехода свойств от слабоводопроницаемого к водопроницаемому и к сильноводопроницаемому состоянию) (1–22 – землетрясения: 1 – 27.02.2010; 2 – 11.03.2011; 3 – 23.10.2011; 4 – 11.04.2012; 5 – 28.10.2012; 6 – 16.04.2013; 7 – 24.05.2013; 8 – 24.05.2014; 9 – 25.04.2015; 10 – 16.09.2015; 11 – 26.10.2015; 12 – 07.12.2015; 13 – 08.09.2017; 14 – 11.12.2017; 15 – 28.09.2018; 16 – 25.10.2018; 17 – 22.02.2019; 18 – 22.07.2020; 19 – 21.05.2021; 20 – 29.07.2021; 21 – 15.01.2022 (извержение влк. Тонга); 22 – 06.02.2023)

В верхнем слабонапорном горизонте, приуроченном к неравномерно трещиноватому коллектору, оценка проницаемости по приливному анализу выполнена для отдельных интервалов, в пределах которых определены отрицательные значения фазового сдвига по приливной волне  $M_2$ , выделенной в смещении грунта и уровне (рисунок 10).

Основное внимание уделено анализу последствий сейсмического воздействия от 22 землетрясений, при которых относительное деформирование флюидонасыщенного коллектора в 2 и более раз превысило значение объемной деформации, рассчитанной по приливному анализу.

Для слабонапорного горизонта не представляется возможным проследить вариации проницаемости неравномерно трещиноватого коллектора, связанные с влиянием землетрясений, из-за относительно коротких интервалов определения параметра. В напорном горизонте скачкообразное изменение проницаемости отмечено после землетрясения Тохоку, 11.03.2011 М 9.1 (2) и вблизи Аляски 22.07.2020 М 7.8 (18) (рисунок 9).

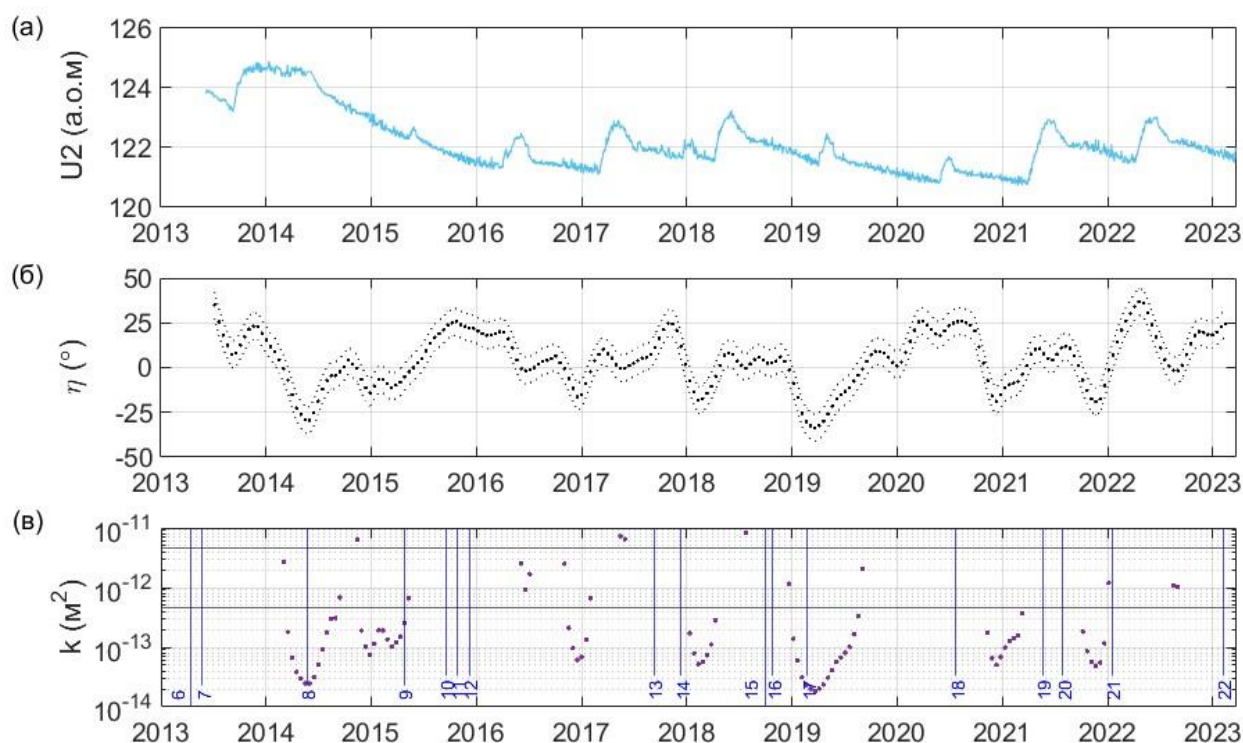


Рисунок 10 – Диаграммы вариаций уровня (а), фазового сдвига (б) и проницаемости (в) слабонапорного горизонта (б – пунктиром показана погрешность; в - горизонтальными линиями обозначены границы перехода свойств от слабоводопроницаемого к водопроницаемому, к сильноводопроницаемому состоянию) (6-22 – землетрясения: 6 – 16.04.2013; 7 – 24.05.2013; 8 – 24.05.2014; 9 – 25.04.2015; 10 – 16.09.2015; 11 – 26.10.2015; 12 – 07.12.2015; 13 – 08.09.2017; 14 – 11.12.2017; 15 – 28.09.2018; 16 – 25.10.2018; 17 – 22.02.2019; 18 – 22.07.2020; 19 – 21.05.2021; 20 – 29.07.2021; 21 – 15.01.2022 (извержение влк. Тонга); 22 – 06.02.2023)

Выделенные диапазоны изменений проницаемости находятся в пределах фоновых (сезонных) вариаций проницаемости. С этим связана и сложность определения сейсмического воздействия на фильтрационные свойства карбонатного коллектора. В качестве дополнительного метода верификации выводов об изменении проницаемости может быть использован расчет вариаций порового давления при прохождении сейсмических волн с учетом девиаторной и объемной деформации коллектора и сопоставление с экспериментальными данными.

В соответствии с моделью пороупругости для теоретической оценки изменений порового давления в флюидонасыщенном коллекторе использованы данные сейсмической регистрации. Было выполнено моделирование изменения порового давления при прохождении объемных и поверхностных сейсмических волн от удаленных землетрясений (рисунок 11). Низкие значения коэффициента нарушенности слабонапорного горизонта  $\alpha_D=0.01-0.10$ , полученные по результатам сейсмического и приливного анализа, соответствуют пороупругой реакции коллектора. Значения коэффициента нарушенности  $\alpha_D=0.06-0.24$  для напорного горизонта могут быть связаны с проявлением неупругих эффектов, которые подтверждаются постсейсмическими эффектами.

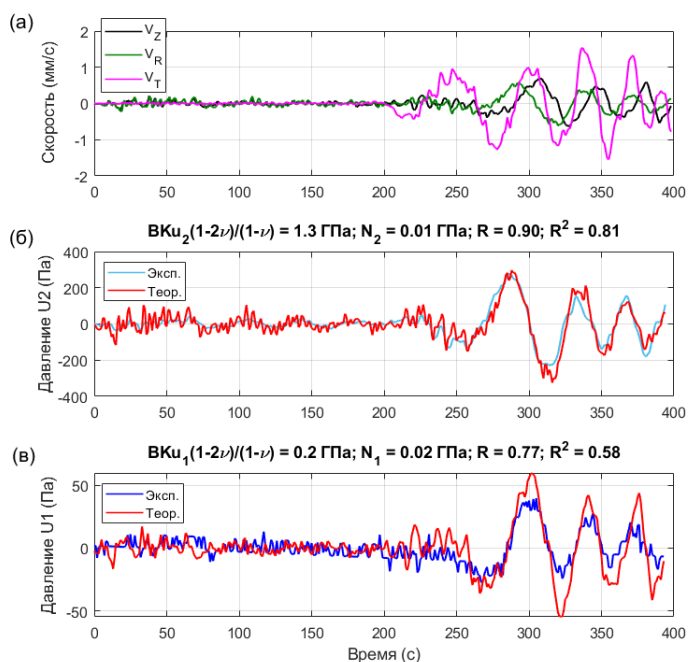


Рисунок 11– Сейсмограммы (а) вертикальной ( $V_Z$ ), радиальной ( $V_R$ ) и трансверсальной ( $V_T$ ) компонент, вариации слабонапорного (б) и напорного водоносных горизонтов (в) при землетрясении 06.02.2023 01:21:42 в Турции  $M 7.8$  (теоретически рассчитанные значения показаны красной линией; экспериментальные – голубой линией для верхнего горизонта и синей линией для нижнего; начало отсчета 0 – время регистрации вступления сейсмических волн на станции  $OBN$ )

Опираясь на анализ опубликованных моделей, соответствующих зарегистрированным гидрогеологическим эффектам, и обработку экспериментальных данных, полученных на территории ГФО «Михнево» за период наблюдений 2010–2023 гг., в работе рассматривается новая модель, в которой учтены ведущие факторы, определяющие режим деформирования карбонатного коллектора (рисунок 12).

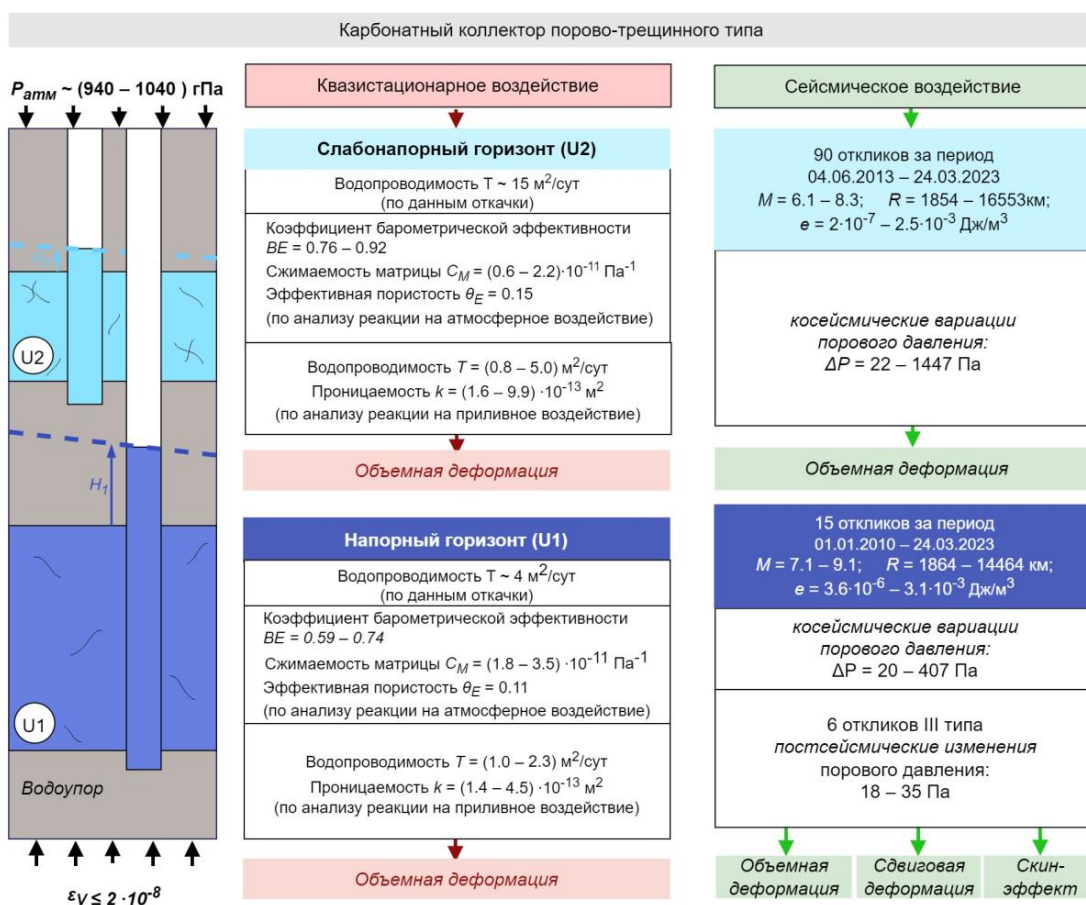


Рисунок 12 – Модель реакции карбонатного коллектора при квазистационарном и сейсмическом воздействии

На данном рисунке в виде отдельных блоков представлен свод результатов прецизионного гидрогеологического мониторинга, проводимого в двух наблюдательных скважинах, вскрывающих неравномерно трещиноватый карбонатный коллектор. В основу модели положена схематизация фильтрационной структуры коллектора с учетом изменения степени трещиноватости водовмещающих пород по глубине. Карбонатный коллектор относится к гидрогеологической структуре, в границах которой сохраняется непрерывность формирования, распределения и движения флюидов вдоль систем трещин, развитых в пределах разновозрастных водоносных горизонтов.

Влияние атмосферного давления и земных приливов рассматриваются в качестве зондирующих сигналов для определения основных фильтрационных параметров флюидонасыщенного коллектора. По данным приливного анализа в пределах выделенных интервалов водопроницаемость карбонатного коллектора в верхней части разреза изменяется от 0.8 до 5.0 м<sup>2</sup>/сут, в нижней части разреза – от 1.0 до 2.3 м<sup>2</sup>/сут.

Реакция карбонатного коллектора на сейсмическое воздействие различается. В верхнем слабонапорном горизонте прослежены многочисленные осцилляции порового давления при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений с амплитудами 22–1447 Па. В нижнем напорном зарегистрировано 15 косейсмических откликов с амплитудами 20–407 Па, 6 из которых сопровождалось постсейсмическими гидрогеологическими эффектами с амплитудами 18–35 Па.

Сейсмическое воздействие может привести к объемной, объемной и сдвиговой деформации и скин-эффекту. Косейсмические и постсейсмические эффекты являются индикаторами вышеперечисленных механизмов и соответствуют различным режимам деформирования карбонатного коллектора.

Полученные результаты подтверждают третье и четвертое защищаемое положение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе детально исследованы закономерности динамического отклика флюидонасыщенного коллектора на квазистационарное и сейсмическое воздействие.

- Реакция флюидонасыщенного коллектора на квазистационарные факторы (атмосферное давление и земные приливы) зависит от гидрогеологических параметров, глубины залегания обводненных пластов и конструкции скважины. На территории ГФО «Михнево» верхний слабонапорный горизонт, вскрытый в скважине в интервале 42.7–56.6 м, подверженный техногенной нагрузке, характеризуется повышенной чувствительностью к атмосферному давлению. Влияние земных приливов выражено слабо. Нижний напорный горизонт, пройденный в интервале 92–115 м, напротив, отличается невысоким

коэффициентом барометрической эффективности и повышенной чувствительностью к земным приливам.

- При исследовании сейсмического воздействия на флюидонасыщенный коллектор необходимо учитывать фоновые вариации исходных параметров. Участки записи, на которых внешние факторы, например, изменение режима питания и разгрузки в естественных и техногенно-нарушенных условиях, приводят к искажению сигналов, следует исключать из рассмотрения.

- В платформенных условиях на территории ГФО «Михнево» гидрогеологические отклики на удаленные землетрясения определяются как характеристиками сейсмических колебаний (тип волны, период, амплитуда), так и амплитудно-частотными параметрами системы «пласт-скважина» и локальными структурно-гидрогеологическими условиями (водопроницаемостью, коэффициентом упругой емкости пласта и др.). В вариациях порового давления, зарегистрированного при прохождении сейсмических волн, обнаружены косейсмические и постсейсмические эффекты.

- Косейсмические эффекты выделены в обоих горизонтах при величине относительной деформации карбонатного коллектора от  $7 \cdot 10^{-9}$  до  $2.6 \cdot 10^{-7}$ , постсейсмические эффекты установлены в напорном горизонте при относительной деформации более  $2.6 \cdot 10^{-7}$ . Увеличение порового давления при сейсмическом воздействии обусловлено сложным механизмом: сочетанием динамического деформирования флюидонасыщенного карбонатного коллектора со скин-эффектом – локальным изменением трещиноватости в околоскважинном пространстве.

- Детальный анализ взаимосвязи между теоретически рассчитанными значениями объемной и сдвиговой деформаций и вариациями порового давления позволил выполнить оценку параметра нарушенности горных пород.

- Модель реакции карбонатного коллектора при квазистационарном и сейсмическом воздействии сформирована по результатам обработки многолетнего ряда измерений гидрогеологических и барометрических параметров.

- На территории ГФО «Михнево» впервые зарегистрирована реакция напорного и слабонапорного горизонтов на глобальное распространение атмосферных волн Лэмба от извержения вулкана Тонга.

- Дистанционный мониторинг фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора является информативным при проведении экспертных оценок инженерно-геологических и гидрогеологических условий территорий, планируемых под строительство объектов различного назначения, включая площадки захоронения РАО и участки АЭС.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК*

1. **Петухова С. М.** Влияние экзогенных факторов на гидрогеологическую обстановку (на примере ГФО «Михнево») // Процессы в геосредах. – 2020. – № 2 (24). – С. 710–717.
2. 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.
3. 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. – 2021. – № 5. – С. 74–90.
4. Горбунова Э. М., Ряховский И. А., Гаврилов Б. Г., Поклад Ю. В., **Петухова С. М.**, Беседина А.Н. Вариации геофизических полей при извержении вулкана Тонга по данным уникальной научной установки «Михнево» // Геофизические процессы и биосфера. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 5–22.
5. Besedina A., Gorbunova E., **Petukhova S.** Hydrogeological Responses to Distant Earthquakes in Aseismic Region // Water. – 2023. – Vol. 15, № 7. – Art. 1322. – P. 1–19.

### *Публикации в других научных изданиях*

1. **Петухова С. М.**, Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Батухтин И. В. Удаленные землетрясения в вариациях уровня подземных вод по данным высокоточных измерений на территории геофизической обсерватории «Михнево» // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 26 сентября – 2 октября 2021 г. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН. – 2021. – С. 99–103.
2. **Петухова С. М.** Оценка проницаемости коллектора по данным прецизионного мониторинга // XXIII Уральская Молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. – 2022. – С. 140–143.
3. **Петухова С. М.** Использование приливного анализа для оценки фильтрационных свойств коллектора // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы XIV Международной конференции молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН. – 2022. – С. 144–149.
4. **Петухова С. М.**, Беседина А. Н., Горбунова Э. М. Гидрогеологические отклики на землетрясения в Турции 6 февраля 2023, зарегистрированные на территории ГФО «Михнево» // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, Сочи, 17–23 сентября 2023 года. – М.: МГУ. – 2023. – С. 183–189.
5. Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N., Batukhtin I., **Petukhova S.** Study of Hydrogeological Responses of Dual Porous Collectors to Dynamic Deformation of Rock Mass // AIP Conf. Proc. – 2022. – Vol. 2509, №1. – Art. 020077.