

На правах рукописи



БОЛДИНА Светлана Васильевна

**ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В
СИСТЕМЕ «СКВАЖИНА-ВОДОВМЕЩАЮЩАЯ ПОРОДА»**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ – 2015 г.

Работа выполнена в Камчатском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизическая служба РАН (КФ ГС РАН).

Научный руководитель:

Копылова Галина Николаевна - доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией геофизических исследований Камчатского филиала Геофизической службы РАН.

Научный консультант:

Мороз Юрий Федорович - доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геофизических полей и предвестников землетрясений Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Официальные оппоненты:

Имаев Валерий Сулейманович - доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Института земной коры Сибирского отделения РАН.

Ершов Валерий Валерьевич - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики землетрясений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Камчатгеология» (ОАО «Камчатгеология»), г. Петропавловск-Камчатский

Защита состоится «12» мая 2015 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.073.01 при Иркутском государственном техническом университете по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, ИрГТУ, ауд. Е-301

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ Иркутского государственного технического университета и на сайте <http://www.istu.edu/structure/54/4393/>.

Отзывы на диссертацию и автореферат должны представляться в диссертационный совет не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, наименование организации и должность в этой организации. Отзыв в 2 экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета Мальцевой Галине Дмитриевне по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, ИрГТУ, диссовет Д 212.073.01, (тел.8(3952)405-348, 89149323049, e-mail: dis@istu.edu).

Автореферат разослан «02» апреля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат геолого-минералогических наук



Мальцева Г.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах традиционно рассматриваются в качестве эффективного способа оценки вариаций напряженно-деформированного состояния (НДС) верхних горизонтов земной коры, в т. ч. сейсмоструктурной деформации на стадии подготовки сильных землетрясений [Киссин, 1993]. Например, отклик уровня воды на земные приливы показывает, что скважинные уровнемерные наблюдения могут быть использованы для обнаружения небольших деформаций в коре порядка 10^{-8} – 10^{-9} . Обнаружение аномальных изменений уровня воды перед рядом сильных землетрясений [Roeloffs, 1988; Wakita, 1975, 1981; King et al., 1999, 2000; Копылова, 2001, 2005, 2006] позволяет предполагать существование гидрогеодинамических предвестников, которые могут использоваться для сейсмического прогноза.

Несмотря на очевидную чувствительность систем «скважина – водовмещающая порода» к деформациям и хорошо разработанную теорию, описывающую взаимодействие между поровым давлением и упругой деформацией горных пород [Rice, Cleary, 1976], использование пьезометрических скважин для обеспечения количественных оценок вариаций НДС среды сейсмоактивных регионов довольно ограничено. Это связано с тем, что до настоящего времени не имеется полного объяснения разнообразия наблюдаемых откликов уровня воды в скважинах в результате воздействия землетрясений, а имеющиеся примеры проявления гидрогеодинамических предвестников весьма малочисленны. Имеются и другие нерешенные вопросы в использовании пьезометрических скважин в качестве деформографов. К таким вопросам, в частности, относится необходимость выяснения роли локальных гидрогеологических условий и особенностей отдельных скважин, включая различие упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород, при изучении откликов уровня воды при воздействии землетрясений и процессов их подготовки.

Особенности вариаций уровня воды при сейсмических воздействиях могут определяться, с одной стороны, закономерностями поведения пористых упругих водонасыщенных горных пород при изменении НДС среды и, с другой стороны, свойствами наблюдательной системы, включающими упругие и фильтрационные свойства водовмещающих пород, степень изолированности контролируемых подземных вод, а также геометрические параметры скважины.

Моделирование гидрогеодинамических процессов при сейсмических воздействиях для конкретных систем «скважина – водовмещающая порода», основывающиеся на данных многолетних уровнемерных наблюдений и современных теоретических подходах, может быть направлено на решение важной задачи геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов и поиска предвестников землетрясений – оценку информативности отдельных наблюдательных скважин, а также будет способствовать развитию теоретического знания о формировании режима подземной гидросферы и его влиянии на геофизические поля.

Целью работы является развитие научно – методических основ гидрогеодинамического метода мониторинга земной коры сейсмоактивных регионов по данным уровнемерных наблюдений в пьезометрических скважинах на примере Камчатки.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в пьезометрических скважинах и теоретических моделей их формирования в системах «скважина – водовмещающая порода» (по литературным данным).

2. Оценить упругие, фильтрационные параметры и пористость вскрытых скважинами водовмещающих пород с применением традиционных и модифицированных методов оценки барометрического и земно-приливного откликов уровня воды; построить модельные зависимости реакции уровня воды в отдельных скважинах на вариации порового давления с учётом их строения, фильтрационных и упругих свойств водовмещающих пород.

3. Выполнить моделирование различных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, зарегистрированных в скважинах Камчатки и вызванных различными механизмами сейсмического воздействия на состояние системы «скважина – водовмещающая порода».

4. Разработать феноменологическую модель гидрогеодинамических процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в реальной системе «скважина – водовмещающая порода» на примере пьезометрических скважин Камчатки.

5. Оценить возможность количественной оценки объемной деформации водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений в скважине в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды.

Защищаемые научные положения

1. Выделенные гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки описываются теоретическими моделями поведения системы «скважина – водовмещающая порода» при различных механизмах сейсмического воздействия, включающих процессы подготовки землетрясений, образования разрывов в их очагах и распространения сейсмических волн.

2. Результаты моделирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды показали, что ведущими процессами их формирования являются упругая сеймотектоническая деформация водовмещающих пород и динамическое воздействие сейсмических волн, определяемое их амплитудно-частотным составом, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород и строением скважин.

3. Создана феноменологическая модель гидрогеодинамических процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды на основе используемого комплекса методов проведения и обработки данных уровнемерных наблюдений на скважинах Камчатки, теоретических моделей и результатов моделирования.

Научная новизна и практическая значимость. Научные результаты работы существенно дополняют и расширяют представления о гидрогеодинамических процессах, происходящих в системах «скважина – водовмещающая порода» под влиянием сейсмичности, и направлены на развитие научно-методических основ гидрогеодинамического метода мониторинга земной коры в сейсмоактивных регионах.

Впервые построенная феноменологическая модель гидрогеодинамических процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в реальной системе «скважина – водовмещающая порода» на примере скв. ЮЗ-5 и 1309 в дальнейшем может привлекаться для интерпретации текущих данных уровнемерных наблюдений в скважинах сейсмоактивных районов в целях мониторинга НДС среды и оценки сейсмической опасности.

На примере скв. Е-1 продемонстрирована возможность количественной оценки объемной деформации водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды.

Экспериментальные данные, методы исследований, аппаратура и программные средства. В работе использовались 10-минутные данные уровнемерных наблюдений на скв. ЮЗ-5 и Е-1, полученные Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) и на скв. 1303 и 1309, полученные ОАО «Камчатгеология» с использованием *цифровых комплектов аппаратуры*, включающих универсальный регистратор Кедр А2, ультразвуковым датчиком уровня воды (чувствительность ± 0.1 см) и датчиком атмосферного давления (чувствительность ± 0.1 гПа). Производитель оборудования - ООО «Полином», г. Хабаровск.

Для характеристики сейсмологических данных использовались Региональный каталог землетрясений Камчатки, полученный КФ ГС РАН, и электронные ресурсы сайтов <http://www.iris.washington.edu/>, <http://www.globalcmt.org/>.

Теоретической основой решения научных задач является теория пороупругости [Biot, 1941, Biot, 1957] и ее приложения для систем «скважина – водовмещающая порода» [Van der Kamp, Gale, 1983; Igarashi, Wakita, 1991; Quilty, Roeloffs, 1991; Roeloffs, 1988, 1996; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989], статическая теория приливов [Мельхиор, 1968], теоретические основы динамики подземных вод [Шестаков, 1973, 1985; Карслоу, Егер, 1964; Синдаловский, 2006].

Методы исследований включают:

- *мониторинговые исследования* изменений уровня воды в скважинах;
- *барометрический и приливной анализ*, основанные на исследовании реакции уровня воды в скважине на атмосферное давление и земные приливы;

- метод сравнительного анализа результатов обработки уровневых данных с результатами, полученными другими авторами.

Для решения научных задач использовались:

Теоретические модели:

- пьезометрическая скважина – изолированные водовмещающие породы [Теркотт, Шуберт, 1985];

- реакция уровня воды в скважине на гармонические вариации порового давления в водовмещающих породах с учетом упругих параметров и пористости водовмещающих пород и геометрии скважины [Hsieh et al., 1987];

- отклик системы «скважина - водовмещающая порода» на воздействие сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений [Cooper et al., 1965];

- решение одномерного уравнения математической теории диффузии для удаленного точечного источника возмущения [Карслоу, Егер, 1964; Crank, 1975].

Физические модели:

- эффект прохождения сейсмических волн через водонасыщенный образец [Шмонов и др., 2002]

- локальное улучшение фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях вследствие декольматации трещин [Кочарян и др., 2011].

Для оценки барометрического и приливного откликов уровня воды по данным наблюдений на скважинах использовались следующие *программные средства*:

- пакет программ приливного анализа ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994];

- программа визуализации и обработки временных рядов данных геофизического мониторинга DIAGNOZ 2.0 [Копылова, Латыпов, Пантюхин, 2003];

- пакет программ многомерного анализа временных рядов систем низкочастотного геофизического мониторинга [Любушин, 1993].

Личный вклад автора. Автор работы принимала участие в обработке данных уровневых наблюдений. Ею выполнены барометрический и приливной анализ вариаций уровня воды на скважинах, оценены фильтрационные и упругие параметры водовмещающих пород, обосновано использование теоретических моделей и параметров моделирования, выполнены математическое моделирование и расчеты, а также теоретический анализ полученных результатов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Представленные в диссертации научные положения соответствуют формуле специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» и отражают исследования гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая порода» при воздействии землетрясений и процессов их подготовки, основывающиеся на данных многолетних уровневых наблюдений и современных теоретических подходах. Изучение этих процессов способствует развитию теоретического знания о формировании режима подземной гидросферы и его влиянии на геофизические поля.

Результаты данного научного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта специальности:

1. Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей.

Апробация работы и публикации. Основные результаты исследований неоднократно докладывались на региональных и российских конференциях: III региональная молодежная научная конференция «Исследования в области наук о Земле», КНЦ ДВО РАН, 2004; IV региональная молодежная научная конференция «Исследования в области наук о Земле», КНЦ ДВО РАН, 2005; конференция ИВиС ДВО РАН, посвященная дню вулканолога, 2005, 2010, 2011; научно-техническая конференция «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки», КФ ГС РАН, 2006; межрегиональная научно-практическая конференция в КамГУ, 2006; Всероссийское совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, Иркутск, 2006, 2012, Тюмень 2009; Девятые геофизические чтения имени В.В. Федынского, Москва, 2007; Международный научный симпозиум «Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири», Южно-Сахалинск, 2007, Хабаровск 2010 г.; научно-техническая

конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», КФ ГС РАН, 2007, 2009, 2011, 2013; 7-ое международное совещание по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (JKASP-2011); научные чтения памяти Ю. П. Булашевича, Екатеринбург, 2011, 2013; международная сейсмологическая школа, Владикавказ 2010, Апатиты, 2011; всероссийская конференция «Современная геодинамика», Иркутск, 2012; научно-практическая конференция «Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии», Москва, 2013.

Результаты работы неоднократно обсуждались на заседаниях лаборатории геофизических исследований КФ ГС РАН, на научных семинарах КФ ГС РАН и на заседаниях кафедры географии, геологии и геофизики КамГУ.

По теме диссертации автором опубликовано 33 научные работы, в том числе 10 работ в журналах «Вулканология и сейсмология», «Тихоокеанская геология», «Физика Земли», «Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле», рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Общий объем работы составляет 136 страниц машинописного текста, в том числе 18 таблиц, 47 рисунков и список литературы из 115 наименований.

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю благодарность за постановку задачи, обсуждение результатов, за поддержку, ценные советы и консультации по оформлению научных результатов данной работы научному руководителю заведующей лабораторией геофизических исследований КФ ГС РАН, доценту, д. г.-м. н. Копыловой Галине Николаевне, за внимание и поддержку на этапе представления и защиты диссертационной работы д. г.-м. н. Морозу Юрию Федоровичу. Автор также выражает признательность в.н.с. лаборатории сейсмологии КФ ГС РАН, к. ф.-м. н. Павлову В.М. и сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН д. г.-м. н. Кирюхину А.В. и к. т. н. Дрознину В.А. за содержательное обсуждение работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновывается актуальность работы, определяются ее цели и задачи, дается краткое описание работы, а также излагаются защищаемые положения и научные результаты.

Глава 1. «ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ВОДЫ В ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ, ИХ ТИПИЗАЦИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ». В главе дается характеристика камчатских наблюдательных скважин (ЮЗ-5, 1303, 1309 и Е-1), контролирующих напорные подземные воды (табл.1), и локальных гидрогеологических условий в районе скважин. Приводится описание гидрогеосейсмических вариаций, выявленных в изменениях уровня воды в этих скважинах их типизация и теоретические модели формирования таких вариаций (по литературным данным).

Проведение многолетних цифровых уровнемерных наблюдений на пьезометрических скважинах Камчатки дало возможность диагностировать различные типы гидрогеосейсмических вариаций в изменениях уровня воды, представленные в работах [Копылова, 2001, 2006; Смолина, 2008; Копылова, Болдина и др., 2012; и др.]. Уровнемерные наблюдения на скв. ЮЗ-5, Е-1 (КФ ГС РАН) и 1303, 1309 (ОАО «Камчатгеология») включают измерения уровня воды и атмосферного давления с интервалом опроса 10 мин с помощью системы цифровой регистрации уровня воды в скважине и атмосферного давления Кедр А2 (ООО «Полином», г. Хабаровск).

Методика обработки данных уровнемерных наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды с учетом постоянно действующих факторов барометрической и приливной нагрузки, осадков и сезонности дана в работах [Копылова, 2005; Копылова, Бормотов, 2004; Копылова, Болдина и др., 2012].

В работах [Копылова, 2001, 2006; Копылова, Болдина и др., 2012] представлена типизация гидрогеосейсмических вариаций: (тип I) - гидрогеодинамический предвестник землетрясения; (тип II) - косейсмические скачки уровня воды вследствие изменения статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах местных землетрясений; (тип III) - постсейсмическое понижение уровня воды в результате воздействия землетрясения; (тип IV) - колебания уровня воды вследствие динамического воздействия сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений.

Табл. 1 - Характеристика наблюдательных скважин

| Скважина, а.о., м | Координаты, град | | Глубина, м Фильтр, м | Уровень, м | Состав пород, Возраст | Характеристика флюида | Период наблю- дений, дд.мм.гг |
|----------------------|------------------|--------|----------------------------|---------------|--|---|---|
| | с. ш. | в. д. | | | | | |
| <u>Е1</u> 180 м | 53.26 | 158.48 | <u>665</u> 625-647 | 28 | <u>туфы</u> N ₂ | холодный, минерализ., газ N ₂ -CH ₄ | 26.06.03 – 1.04.04 VII,2006-ХII,2009 |
| <u>ЮЗ-5</u> 70 м | 53.17 | 158.41 | <u>800</u> 310-800 | 1.5 | <u>алевролиты</u> K ₂ | холодный пресный | 26.05.03 – 5.11.03 |
| <u>1303</u> 31 м | 53.08 | 158.21 | <u>800</u> 517-717 | 25 | <u>туфоалев- ролиты</u> N ₂ -N ₁ | холодный пресный | I-IV, 2006 |
| <u>1309</u> 406 м | 56.03 | 158.57 | <u>790</u> 223-790 | 4 | <u>туфы</u> Na ₁ | холодный пресный | I-V, 2006 |

Типы I-II и IV соответствуют механизмам сейсмического воздействия [Копылова, 2006]:

1. *Динамическое воздействие* связано с прохождением сейсмических волн, вызывающих импульсы сжатия – расширения водовмещающих пород и соответствующие в них изменения уровней воды, связанные, в основном, с поверхностными волнами от сильных удаленных землетрясений, вызывающих вынужденные и свободные колебания уровней воды [Cooper et al., 1965];

2. *Статическое воздействие* связано с изменением статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений. При этом распределение зон косейсмического сжатия и расширения определяется, в основном, механизмом очага землетрясения [Wakita, 1975]. Этот эффект может проявляться в изменениях уровней напорных подземных водах на расстояниях не более первых сотен километров от эпицентральной области;

3. Третий механизм связан с деформациями водовмещающих пород, вызванными *процессами подготовки сильных землетрясений*. На стадии подготовки землетрясения может развиваться упругая деформация и дилатансия водовмещающих пород, вызывающие изменение структуры порового пространства и фильтрационных связей, нарушение фазового равновесия в подземных водах.

Тип III был дополнительно выделен после сильнейшего за время наблюдений Кроноцкого землетрясения (КЗ) 5.12.1997 г., M=7.8, R=316 км [Копылова, 2006].

В работе [Копылова, 2006] представлены данные детальных наблюдений в течение восьми циклов в скв. ЮЗ-5, в которых обнаружены вариации уровня воды в связи с землетрясениями: гидрогеодинамический предвестник КЗ - понижение уровня на 11 см продолжительностью около трех недель (I тип) (рис. 1А), косейсмические скачки повышения и понижения уровня вследствие изменения статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах местных землетрясений с M = 6.2-7.8, R = 128-328 км (II тип) (рис. 1Б), постсейсмическое понижение около 1 м в результате воздействия сейсмических волн от КЗ и последующее восстановление (III тип) (рис. 1В), свободные и вынужденные колебания уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений с M = 9.0–8.3, R = 1670–8250 км (IV тип) (рис. 1Г). В связи с КЗ наблюдалось последовательное проявление вариаций уровня воды, соответствующих типам I, II и III.

В работах [Копылова, Смолина, 2008; Копылова, Болдина и др., 2012] дается описание зарегистрированных постсейсмических вариаций уровня воды в скв. 1309 и 1303.

Во время Олюторского землетрясения, 20.04.2006г., M = 7.6, в скв. 1309 и 1303, расположенных на расстояниях 750-1040 км от эпицентра, зарегистрированы постсейсмические вариации уровня воды: понижение уровня в скв. 1309 и его повышение в скв. 1303 (III-тип). В результате землетрясения Симуширское-1, 15.11.2006г., M = 8.3, R=719-1121 км, наблюдались повышение уровня воды в скв. 1303, колебания уровня в скв.1309. В результате землетрясения Симуширское-2, 13.01.2007г., M = 8.2, R=740-1137 км наблюдался колебательный процесс в обеих скважинах (VI- тип).

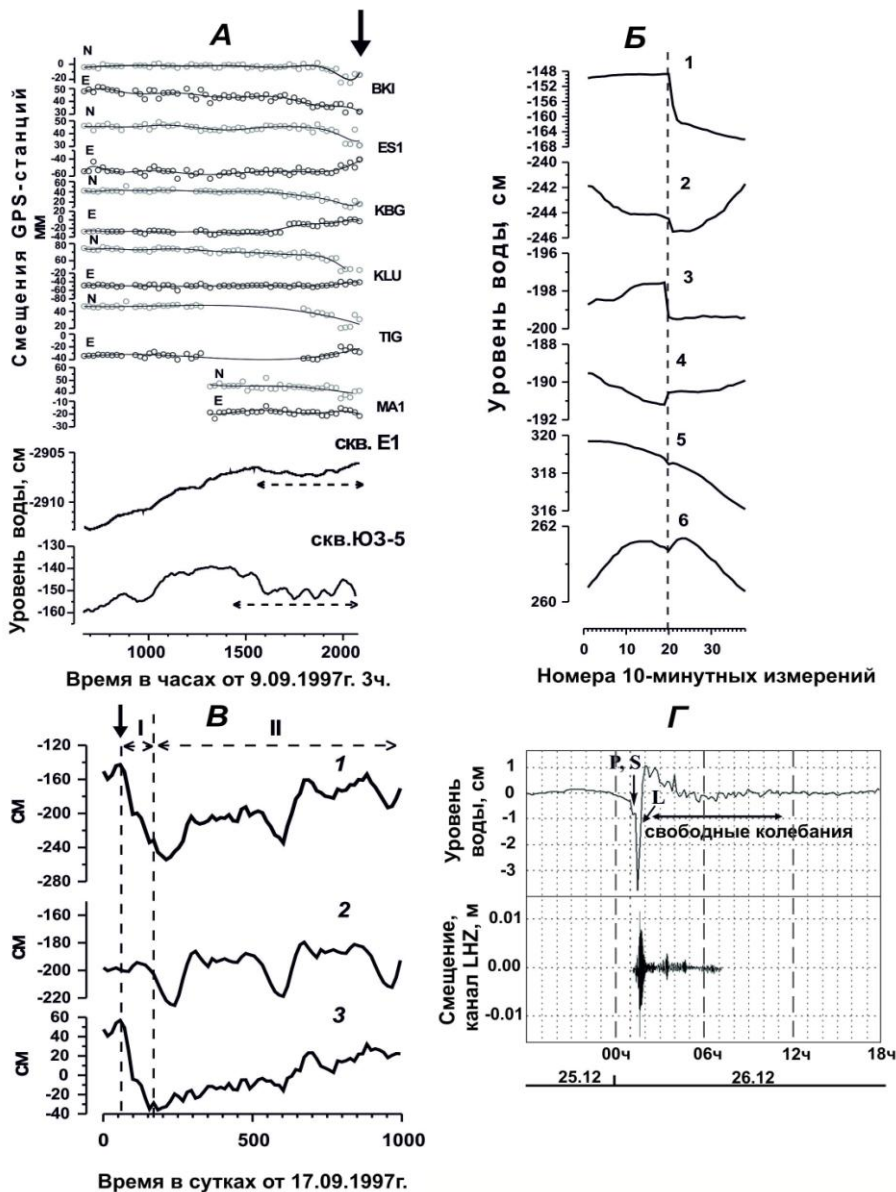
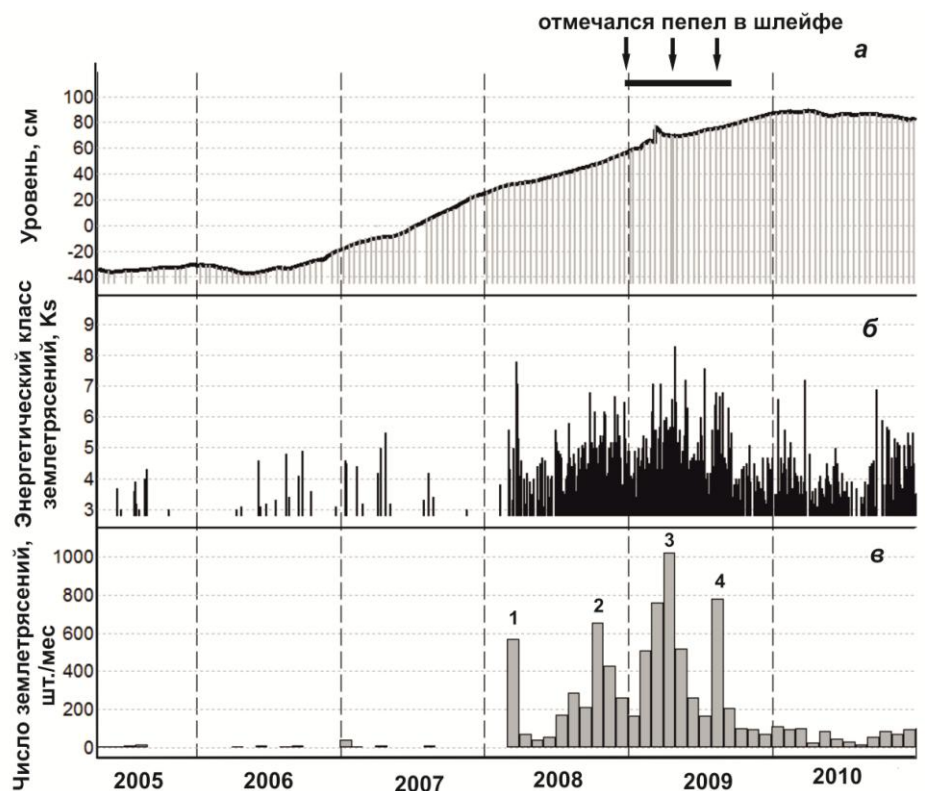


Рис. 1- Типы вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 под влиянием различных механизмов сейсмического воздействия: А – тип I – гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения: показан пунктирной линией; приводится в сопоставлении с перемещениями GPS-станций [Gordeev et al., 2001] и вариациями уровня воды в скважине E-1; Б – тип II - косейсмические скачки уровня воды; В – тип III - понижение уровня воды после Кроноцкого землетрясения в течение 3,5 мес. (I) и его последующее восстановление в течение двух лет (II); 1 – данные наблюдений; 2 – выделенные годовая сезонность и линейный тренд, 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда; Г – тип IV - вынужденные и свободные колебания уровня воды в результате Суматра-Андаманского землетрясения приводятся в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск.

Рис. 2- Изменение уровня воды в скв. E-1 в 2005 – 2010 гг. в сопоставлении с развитием сейсмичности и парогазовой активности вулкана Корякский: а – изменения уровня воды по данным цифровых и ручных измерений (горизонтальной линией показан интервал времени фреатического извержения); б – землетрясения с величинами энергетических классов $K_z=3.1-8.3$ в районе влк. Корякский; в – суммарное за месяц количество землетрясений (цифрами обозначены максимумы сейсмической активности: 1 – март 2008 г., 2 – октябрь 2008 г., 3 – апрель 2009 г., 4 – август 2009 г.).



В работах [Копылова, 2001, 2008; Копылова, Болдина и др. 2012; Копылова, Болдина, 2012а,б] представлена характеристика, выделенных в изменениях уровня воды в скв. Е-1 гидрогеосейсмических вариаций. Примерно перед 70% субдукционных землетрясений ($M \geq 5$, $R \leq 350$ км) происходило понижение уровня воды с повышенной скоростью в течение времени от суток до месяцев (I-тип). Перед КЗ наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды, синхронное с понижением уровня воды в скважине ЮЗ-5 (рис. 1А) (I-тип). Повышение уровня в скв. Е-1 с аномально высокой скоростью (рис. 2а) с середины 2006 по декабрь 2009 г. и постсейсмические повышения уровня воды в связи с 13 местными землетрясениями с $M=5.8-7.8$, $R = 100-320$ км продолжительностью 9-90 сут (III тип).

Обнаружение различных типов вариаций уровня воды в скважинах в связи с землетрясениями требует объяснения их формирования на основе теоретических моделей.

Модель статически изолированного отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород может применяться для описания косейсмических скачков и предсейсмических вариаций уровня воды, вызванных квазиупругой деформацией водовмещающих пород:

$$D = -\Delta h / A_v, \quad (1)$$

где D - объемная деформация в нанострейнах: «+» соответствует растяжению, «-» - соответствует сжатию; Δh - изменение уровня воды в см: «+» соответствует повышению уровня воды, «-» соответствует понижению уровня воды, A_v - величина приливной чувствительности уровня воды по отношению к объемной деформации.

Величина приливной чувствительности в случае проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине на изменения НДС водовмещающих пород, при котором течением подземных вод (фильтрацией) и инерционностью водообмена между скважиной и водовмещающими породами можно пренебречь, строго определяется упругими параметрами водовмещающих пород [Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006; Болдина, Копылова, 2008; Копылова, Стеблов, Болдина и др., 2010].

Интерпретация косейсмических скачков уровня воды в скважинах для оценки изменения НДС водовмещающих пород, вскрытых скважинами, предполагает наличие двух математических моделей: модели, описывающей реакцию порового давления на изменение НДС водонасыщенных горных пород, и модели, описывающей реакцию уровня воды в скважине на изменение порового давления в вскрытых скважиной водовмещающих породах [Roeloffs, 1988]. Такие модели разрабатываются на основе теории пороупругости, изложение которой дано в работах [Biot, 1941; Rice, Cleary, 1976; Kumpel, 1991; Nur, Byerlee, 1971]. Примеры приложения теории для описания поведения системы «скважина – водовмещающая порода» при изменении НДС водонасыщенных горных пород, вызванного земными приливами, атмосферной нагрузкой, крипповыми подвижками по разлому и сейсмическими воздействиями приводятся в [Барабанов, 1984; Барабанов и др., 1988; Cooper et al., 1965; Hsieh et al., 1987; Igarashi, Wakita, 1991; Quilty, Roeloffs, 1991; Roeloffs, 1989, 1996, 1998; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006, 2007; Болдина, Копылова, 2006, 2008].

В основе теории лежит решение уравнения связи деформации ε_{ij} и напряжения σ_{ij} для изотропных сред, применяемого для оценки пороупругих свойств водовмещающих пород [Biot, 1941; Biot, 1957; Nur, Byerlee, 1971; Rice, Cleary, 1976]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\beta}{3} \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1-2\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha \delta_{ij} p \right), \quad (2)$$

где ε_{ij} и σ_{ij} - макроскопические деформация и напряжение (положительные для расширения), p - поровое давление (положительное для сжатия), δ_{ij} - символ Кронекера (при $i = j$, $\delta_{ij}=1$, при $i \neq j$, $\delta_{ij}=0$), σ_{kk} - сумма главных напряжений, $\sigma_{kk} = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$.

Дренированная (при условии оттока порового флюида) сжимаемость скелета β оценивается по формуле $\beta = 3(1-2\nu)/2G(1+\nu)$. Параметр α - коэффициент эффективного напряжения Био, определяется по формуле $\alpha = 3(\nu_u - \nu)/B(1-2\nu)(1+\nu_u)$, где ν - (дренированные условия) и ν_u -

(недренированные условия) коэффициенты Пуассона. Коэффициент Скемптона B выражается из уравнения $p = -B\sigma_{kk} / 3$. Пределы изменения параметров ν , ν_u и B : $\nu \leq \nu_u \leq 0.5$; $0 \leq B \leq 1$.

Атмосферное давление и земные приливы являются постоянно действующими природными сигналами, изменяющими НДС водовмещающих пород.

По реакции уровня воды в скважине на атмосферное давление оценивается величина барометрической эффективности E_b [Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006]. Величина E_b определяется упругими свойствами и пористостью водовмещающих пород, а также степенью их изоляции от атмосферы.

По реакции уровня воды в скважине на земные приливы оценивается величина приливной чувствительности A_s [Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006]. Величина A_s характеризует способность порового давления откликаться на изменение эффективного напряжения в скелете и определяется пористостью и сжимаемостью водовмещающих пород.

Наблюдательные системы «скважина – водовмещающая порода» обладают индивидуальными свойствами, имеющими влияние на формирование отклика уровня воды на изменение давления в водовмещающих породах [Roeloffs, 1988, 1996; Копылова, Болдина, 2006]. Для описания индивидуальных свойств таких систем используются следующие параметры: а) - упругие свойства водовмещающих пород: сжимаемость порового флюида β_f , недренированная (при условии отсутствия оттока порового флюида) сжимаемость твердой фазы скелета β_u , дренированная сжимаемость скелета с учетом пор β , коэффициент Скемптона B , удельная упругая емкость S_s , модуль сдвига G ; б) - фильтрационные свойства водовмещающих пород: пористость ϕ и коэффициент фильтрации k ; в) - геометрия наблюдательной скважины: r_w – радиус скважины в районе фильтра, r_c – радиус скважины, где происходят колебания уровня.

По данным уровневых наблюдений, включающих синхронное измерение уровня и атмосферного давления, оцениваются величины E_b и A_s . По этим величинам и с использованием табличных значений сжимаемости жидкости β_f и недренированной сжимаемости порообразующих минералов β_u могут оцениваться величины пороупругих параметров водовмещающих пород для квазистатических изолированных условий [Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006]:

$$\beta = [1 - E_b] / E_b (3 / 2 [\rho g A_s (1 + \nu)] - \beta_u), \quad (3)$$

где ρ - плотность жидкости, и g - гравитационное ускорение,

$$B = \rho g A_s \beta / [1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)], \quad (4)$$

$$G = 3(1 - 2\nu) / 2\beta(1 + \nu), \quad (5)$$

$$S_s = \rho g (\beta + \phi \beta_f), \quad (6)$$

$$\phi = [(\beta - \beta_u)(1 - B)] / [B(\beta_f - \beta_u)]. \quad (7)$$

Возможность применения формул (3)-(7) требует предварительного обоснования статически изолированных условий в водовмещающих породах и оценку роли эффектов течения воды в скважину и из скважины [Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006] на основе *математической модели реакции уровня воды в скважине на гармонические вариации порового давления в водовмещающих породах с учетом оцененных упругих параметров и пористости насыщенных горных пород и геометрии скважины* [Hsieh et al., 1987].

Приливные деформации не вызывают течение воды в совершенно изолированных водовмещающих породах, т. к. большой пространственный радиус действия земных приливов предполагает отсутствие горизонтальных градиентов порового давления. Кроме этого, при совершенной изоляции водовмещающих пород слабопроницаемыми породами вертикальное течение подземных вод исключается. В этом случае для любого периодического (сейсмического, приливного) возмущения порового давления с амплитудой p_0 , на достаточно длинных периодах, таких, чтобы временем, необходимым для течения воды в ствол и из ствола скважины, можно было пренебречь, уровень воды в скважине x_0 отслеживает напор h_0 : $x_0 = p_0 / \rho g = h_0$.

Если рассматривать ситуацию с периодически изменяющимся поровым давлением в водовмещающих породах, то на достаточно коротких периодах колебаний давления существенным является время, необходимое для течения жидкости в ствол и из ствола скважины. На таких периодах пиковое изменение уровня воды будет меньше, чем по $x_0 = p_0 / \rho g = h_0$, и будет запаздывать по отношению к пику напора h_0 . В этом случае амплитудное соотношение (соотношение между амплитудой изменений уровня воды в скважине и амплитудой изменения гидростатического напора) определяется как

$$A = |x_0/h_0| = (E^2 + F^2)^{1/2}, \quad (8)$$

а фазовый сдвиг

$$\eta = \arg(x_0/h_0) = \arctan(F/E). \quad (9)$$

При этом

$$E = 1 - \beta_w (\psi \text{Ker} \alpha_w + \phi_w \text{Kei} \alpha_w), \quad (10)$$

$$F = \beta_w (\phi_w \text{Ker} \alpha_w - \psi \text{Kei} \alpha_w), \quad (11)$$

$$\phi_w = \frac{-(\text{Ker}_1 \alpha_w + \text{Kei}_1 \alpha_w)}{2^{1/2} \alpha_w (\text{Ker}_1^2 \alpha_w + \text{Kei}_1^2 \alpha_w)}, \quad (12)$$

$$\psi = \frac{-(\text{Ker}_1 \alpha_w - \text{Kei}_1 \alpha_w)}{2^{1/2} \alpha_w (\text{Ker}_1^2 \alpha_w + \text{Kei}_1^2 \alpha_w)}, \quad (13)$$

где $\text{Ker} \alpha_w$, $\text{Kei} \alpha_w$ и $\text{Ker}_1 \alpha_w$, $\text{Kei}_1 \alpha_w$ представляют действительную и мнимую части функции Кельвина нулевого и первого порядка, а $\alpha_w = r_w (\omega S/T)^{1/2}$ и $\beta_w = \omega r_c^2 / 2T$ ($\omega = 2\pi/\tau$ - частота волны, τ - период волны) - безразмерные функции частоты, выраженные через параметры водовмещающих пород: $S = S_d$ - упругая емкость водовмещающих пород и T - коэффициент водопроницаемости и геометрические параметры скважины: r_w и r_c .

Математическая модель отклика системы «скважина - водовмещающая порода» на воздействие сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений [Cooper et al., 1965] выводится из волнового уравнения для затухающих колебаний столба воды в скважине и в прифильтровой зоне водовмещающих пород. В [Cooper et al., 1965] показано, что вариации уровня воды в скважине при прохождении сейсмических волн могут быть обусловлены изменениями порового давления в водовмещающих породах и вертикальными смещениями поверхности земли. При этом степень, с которой уровень воды в скважине реагирует на землетрясение, определяется не только характеристиками скважины и вскрытых водовмещающих пород, но и в значительной степени зависит от вида и периода сейсмической волны. В случае Релеевских волн, когда их период равен или больше резонансной частоты скважины ω_w , изменения уровня воды практически полностью определяются изменениями порового давления в водовмещающих породах $p_0 = \rho g h_0$, где h_0 - амплитуда изменения напора, вызванная деформацией водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн.

Резонансная частота ω_w зависит, в основном, от эффективной высоты столба воды в скважине $H_e = H + 3d/8$, где H - высота столба воды в обсаженном стволе скважины, d - высота столба воды в области вскрытых водовмещающих пород. Резонансная частота скважины определяется как $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$. Отсюда можно оценить периоды сейсмических волн, которые могут вызывать резонансный эффект усиления гармонических вариаций порового давления в скважине при достаточно высоких величинах водопроницаемости: $\tau \geq 2\pi/\omega_w$. Усиление вариаций уровня воды в скважине по отношению к изменению напора для резонансных частот выражается формулой:

$$A = x_0/h_0 = \left[\left(1 - \frac{\pi r_w^2}{T\tau} \text{Kei} \alpha_w - \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} \right)^2 + \left(\frac{\pi r_w^2}{T\tau} \text{Ker} \alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (14)$$

Усиление колебаний уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли A выражается формулой:

$$A' = x_0/a = \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} A, \quad (15)$$

где a - амплитуда смещения поверхности земли.

Математическая модель длительного понижения уровня воды в скважине после прохождения сейсмических волн описывается одномерным решением уравнения математической теории диффузии [Карслоу, Егер, 1964; Crank, 1975] для идеальной пьезометрической скважины, вскрывающей однородные, изотропные и неограниченные водовмещающие породы, и аппроксимацией падения порового давления в водовмещающих породах точечным источником в дифференциальном виде как

$$\frac{\partial h}{\partial t} = c \frac{\partial^2 h}{\partial R^2}, \quad (16)$$

где $c = k/S_s$ - пьезопроводность водовмещающих пород.

Заменяя величину h на величину изменения уровня воды в скважине x и решая это уравнение относительно x , пренебрегая трением и инерционностью столба воды в стволе скважины, позволяет оценить расстояние от скважины R до точечного источника падения порового давления в водовмещающих породах [Crank, 1975; Абрамовиц, Стеган, 1979]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}(R/\sqrt{4ct}) \quad (17)$$

где $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$.

ГЛАВА 2. «ОЦЕНКА УПРУГИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД, ВСКРЫТЫХ СКВАЖИНАМИ ЮЗ-5, 1303, 1309 И Е-1». Для наблюдательных скважин (табл. 1), выполнена оценка барометрического и приливного отклика уровня воды. Для трех скважин (ЮЗ-5, 1303 и 1309) оценены упругие параметры водовмещающих пород на основе полученных величин приливной чувствительности, барометрической эффективности и обоснования гипотезы о статически-изолированных условиях в системе «скважина – водовмещающая порода». Выполнен теоретический анализ линейной связи величин E_b и A_s и упругих параметров водовмещающих пород. Оцененные упругие параметры использовались для построения теоретических зависимостей отклика уровня воды в скважинах на периодические изменения порового давления в широком диапазоне периодов на основе математической модели инерционного водообмена между скважиной и водовмещающими породами.

Параметры барометрического отклика уровня воды оценивались методом кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления. Для трех скв. ЮЗ-5 (рис.7), 1303 и 1309 установлены постоянные значения амплитудных передаточных функций (АПФ) от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в диапазоне периодов от первых часов - до первых десятков суток при разности фаз -180° . Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в соответствующих диапазонах периодов и оценить для этих скважин величины E_b : 0.39 см/гПа (скв. ЮЗ-5), 0.43 см/гПа (скв. 1303) и 0.45 см/гПа (скв. 1309) (табл.2) [Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2004, 2006; Болдина, Копылова, 2006, 2008].

Для скв. Е-1 обнаружена частотная зависимость изменения барометрического отклика в диапазоне периодов часы – сутки – десятки суток. При увеличении периода вариаций атмосферного давления происходит рост величины E_b от менее 0.01 до 0.135 см/гПа при увеличении разности фаз от -106° до -166° (табл.2). Особенности барометрического отклика уровня воды в скв. Е-1 обусловлены наличием свободного газа в поровом флюиде, затрудненной связью между водовмещающими породами и скважиной, а также, возможно, зависимостью отклика уровня воды от периода и амплитуды воздействия [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2004, 2006].

Оценка параметров приливного отклика уровня воды – выделенных амплитуд отдельных волн в изменениях уровня воды, амплитудных факторов ($\approx A_s$), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и соответствующей фазой приливного потенциала для отдельных волн

производилась по программе ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]. В изменениях уровня воды выделяются волны S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 [Мельхиор, 1965; Wenzel, 1994]. Использовались только те волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум не менее 10. Величины приливных параметров по наиболее мощной волне P_1S_1 (24 ч) не учитывались из-за зашумленности вариаций уровня воды действием метеофакторов на суточном периоде.

Диапазоны изменения амплитудных факторов для наиболее надежно определяемых волн составляют $0.092\text{--}0.144 \text{ см}/10^{-9}$ (скв. ЮЗ-5), $0.10\text{--}0.17 \text{ см}/10^{-9}$ (скв. 1303) и $0.044\text{--}0.154 \text{ см}/10^{-9}$ (скв. 1309). [Копылова, Болдина, 2004, 2006]. Наиболее приемлемыми величинами в качестве характеристик приливной чувствительности A_s во всем диапазоне приливных периодов, полученных из регрессионного анализа, являются $0.096 \pm 0.004 \text{ см}/10^{-9}$ для скв. ЮЗ-5, $0.143 \pm 0.01 \text{ см}/10^{-9}$ для скв. 1303 и $0.108 \pm 0.01 \text{ см}/10^{-9}$ для скв. 1309 (табл.2) [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2004, 2006; Болдина, Копылова, 2006, 2008]. Уровень воды в скв. Е-1 не реагирует на приливы, поэтому величина A_s для нее не установлена.

Табл. 2 - Оценка упругих параметров и пористости водовмещающих пород, вскрытых скважинами ЮЗ-5, 1303 и 1309 при сжимаемости твердой матрицы скелета $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц)

| Скважина | Барометрическая эффективность E_b , см/гПа | Приливная чувствительность A_s , м/10 ⁻⁷ | Дренированная Сжимаемость скелета β , Па ⁻¹ ·10 ⁻¹¹ | Модуль сдвига G , Па·10 ¹⁰ | Коэффициент Скемптона B | Упругая водоотдача $S = S_s \cdot d$ | Пористость ϕ |
|----------|--|---|---|---|---------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| ЮЗ-5 | 0.39 | 0.096 | 15.2 | 0.39 | 0.67 | $21.4 \cdot 10^{-5}$ | 0.15 |
| 1303 | 0.43 | 0.143 | 7.4 | 0.81 | 0.64 | $20 \cdot 10^{-5}$ | 0.06 |
| 1309 | 0.45 | 0.108 | 10.2 | 0.72 | 0.61 | $8 \cdot 10^{-5}$ | 0.09 |
| Е-1 | 0.01/0.1 ¹ | 0.020/0.031 | 7.59 | 0.79 | 0.07÷0.17 | $5.8 \cdot 10^{-5}$ | 0.01-0.06 |

Примечание: ¹ – первое число – оценка барометрической эффективности для суточного диапазона периодов, второе число – для диапазона периодов десятки – сотни суток

На основании полученных величин A_s и E_b по (3)–(7) оценены упругие параметры и пористость водовмещающих пород, вскрытых скв. ЮЗ-5, 1303 и 1309 (табл. 2), принимая, что $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц), $\beta_f = 4.4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, $\rho = 1.0 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $g = 9.8 \text{ м}/\text{с}^2$, $\nu = 0.25$ и $\nu_u = 0.3$. [Копылова, Болдина, 2004, 2006; Болдина, Копылова, 2006; Болдина, 2004].

Для скважин ЮЗ-5, 1303 и 1309 оцененные величины сжимаемости скелета породы, коэффициента Скемптона, удельной упругой емкости и пористости удовлетворяют ограничениям (рис.3), полученным для этих величин из анализа связи упругих параметров водовмещающих пород и величин E_b и A_s для статически изолированных условий [Болдина, Копылова, 2013]. Сравнение их с величинами пороупругих параметров для водовмещающих пород, сложенных песчаниками [Van der Kamp, Gale, 1983], также указывает на примерное соответствие.

На основе модели инерционного водообмена между скважиной и водовмещающими породами [Hsieh et al., 1987] по (8), (9) построены теоретические зависимости отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис.7), 1303 (рис.4) и 1309 на периодические изменения порового давления в диапазоне минутных и часовых периодов, учитывающие геометрию скважин, упругие и фильтрационные параметры, инерционный эффект водообмена между скважинами и водовмещающими породами [Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006].

Установлено, что на периодах более 6 ч для скв. ЮЗ-5 (рис.7) и более 20 ч для скв. 1303 (рис.4) и 1309 амплитудное соотношение A между вариациями напора и изменениями уровня воды практически равно 1. Отсюда следует, что для скв. ЮЗ-5 инерционный эффект водообмена не оказывает существенного влияния на амплитуду проявления приливного отклика в изменениях уровня воды (рис.7). Для скв. 1309 в диапазоне приливных периодов эффектом водообмена можно пренебречь, т.к. A составляет 0.98-0.99, для скв. 1303 величина приливной чувствительности по волне M_2 искажена за счет инерционного эффекта течения воды в и из скважины (рис.4). Поэтому для более надежного определения упругих и фильтрационных параметров водовмещающих пород

для этой скважины, использовалась приливная чувствительность, полученная по приливной волне O_1 (рис.4). Результаты моделирования согласуются с изменением АПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважинах и показывают, что на периодах, соответствующих диапазону действия приливных и медленных сейсмостектонических вариаций НДС водовмещающих пород (часы – десятки суток), искажение отклика уровня воды в скважинах на изменения порового давления не ожидается [Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006].

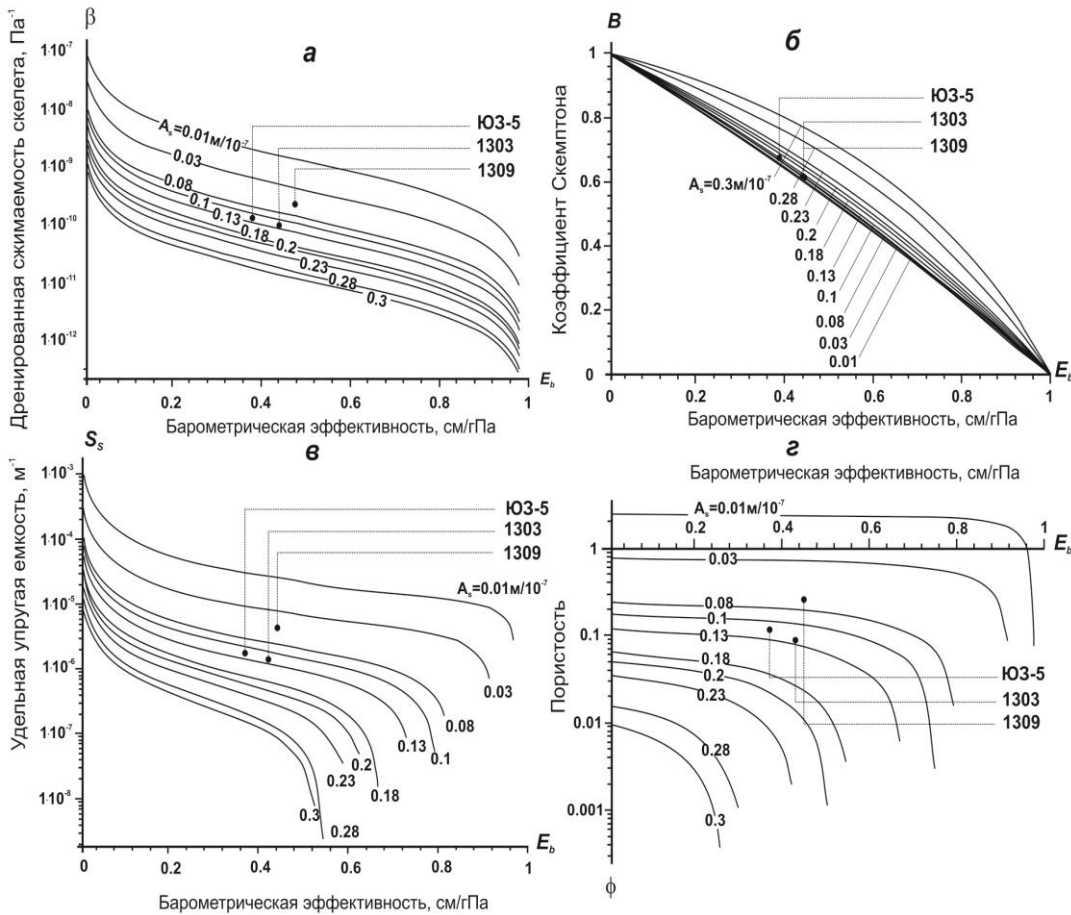
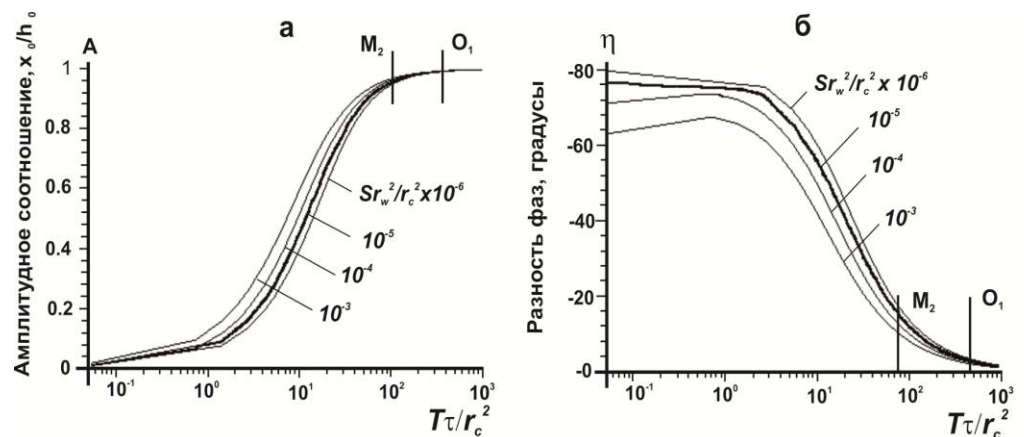


Рис. 3 - Связь упругих параметров водовмещающих пород, вскрытых пьезометрическими скважинами: а – сжимаемости скелета водовмещающей породы β по (3), б - коэффициента Скемптона B по (4), в - удельной упругой емкости S_s по (6), г - пористости ϕ по (7), и величин барометрической эффективности E_b и приливной чувствительности уровня воды A_s для статически изолированных условий в системе «скважина – водовмещающая порода».

Рис.4 - Графики изменений амплитудного соотношения и фазового сдвига при различных значениях $T\tau/r_c^2$ и Sr_w^2/r_c^2 для скважины 1303: а - амплитудное соотношение между изменениями уровня воды в скважине и напора; б – фазовое запаздывание.



Глава 3. «ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СИСТЕМАХ «СКВАЖИНА – ВОДОВМЕЩАЮЩАЯ ПОРОДА» НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИН ЮЗ-5 И 1309». На примере скв. ЮЗ-5 и 1309 рассмотрены особенности гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая порода» при возникновении различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды.

Из предположения о линейном характере связи между вариациями уровня воды и деформациями водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков ($10^{-9} - 10^{-7}$) [Igarashi,

Wakita, 1991; Roeloffs, 1998; Копылова и др., 2010; Болдина, Копылова, 2006, 2008] можно оценить сеймотектоническую деформацию по данным об изменениях уровня воды во всем диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды (часы – первые десятки суток) по формуле (1).

Продолжительность развития гидрогеодинамического предвестника в скв. ЮЗ-5 (рис. 1А) примерно соответствует по периоду верхней границе статически изолированных условий в водовмещающих породах. В этом случае, применение формулы (1) позволяет получить минимальную оценку величины деформации расширения водовмещающих пород на стадии подготовки КЗ ($0.7 \cdot 10^{-7}$) [Копылова, Болдина, 2006, 2012б]. Синхронное проявление предсейсмических перемещений GPS-станций Камчатской сети и гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды в скв. ЮЗ-5 и Е-1 может рассматриваться в качестве показателя связи этих явлений (рис. 1А) [Копылова, Болдина, 2012б].

Для шести землетрясений оценены величины косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скв. ЮЗ-5 ($D_1=75-1.6 \cdot 10^{-9}$), а также характер деформации по направлению изменения уровня воды (табл.3, рис. 1Б). Понижение уровня воды фиксирует деформацию расширения водовмещающих пород, повышение уровня воды – их сжатие. Показано, что полученные оценки косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений на скв. ЮЗ-5, в большинстве случаев, согласуются по знаку и по амплитуде с теоретическими оценками по модели протяженного источника дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве по [Okada, 1987] (табл.3) [Болдина, Копылова, 2008; Копылова, Стеблов, Болдина и др., 2010]. По соотношению энергетических характеристик землетрясений (M , K_s) и их гипоцентральных расстояний оценены параметры землетрясений, сопровождающихся косейсмическими скачками уровня воды в скв. ЮЗ-5: $M_w \geq 0.004R + 5.6$ [Копылова, Стеблов, Болдина и др., 2010].

Табл. 3 - Данные о землетрясениях и косейсмических скачках уровня воды в скважине ЮЗ-5 и оценка косейсмической деформации

| № п/п | Дата ггммдд | Время в очаге чч:мм | Координаты, град | | Глубина км | M_w | Гипоцентральное расстояние, R, км | Амплитуда скачка уровня воды, Δh , см | Объемная косейсмическая деформация в районе скважины ЮЗ-5, 10^{-9} | |
|-------|-------------|---------------------|------------------|--------|------------|-------|-----------------------------------|---|--|--|
| | | | с. ш. | в. д. | | | | | по косейсмическим скачкам уровня, D_1 | по модели дислокационного источника, D_2 |
| 1 | 971205 | 11:27 | 54.0 | 162.3 | 25 | 7.8 | 316 (200)* | -12.0 | 75±4 | 15.5 |
| 2 | 980601 | 05:34 | 52.81 | 160.37 | 31 | 6.9 | 140 | -1.0 | 6.3±0.7 | -2.4 |
| 3 | 990308 | 12:26 | 51.93 | 159.72 | 7 | 7.0 | 164 | -1.7 | 10.6±0.8 | 43.2 |
| 4 | 001220 | 09:20 | 53.31 | 160.06 | 65 | 6.2 | 128 | 0.6 | -3.8±0.5 | -0.4 |
| 5 | 030616 | 22:08 | 55.30 | 160.34 | 190 | 6.9 | 328 | -0.3 | 1.9±0.4 | 0.9 |
| 6 | 040320 | 08:53 | 53.74 | 160.76 | 31 | 6.2 | 169 | 0.25 | -1.6±0.4 | -0.5 |

Примечание: * - гипоцентральное расстояние от скважины ЮЗ-5 до средней точки плоскости смещения.

Результаты моделирования длительного постсейсмического понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 и 1309 по зависимости (17) [Болдина, Копылова, 2008, 2009], показывают, что удовлетворительное соответствие в понижении уровня воды в скв. ЮЗ-5 после КЗ (в течение первых суток) с теоретической зависимостью могло произойти при величине пьезопроводности $c=0.42 \text{ м}^2/\text{с}$ на расстоянии от источника падения порового давления $R=450 \text{ м}$ (рис.7), и удовлетворительное соответствие в понижении уровня воды в скв. 1309 после Олюторского землетрясения при $c=1.62 \text{ м}^2/\text{с}$ и $R=190 \text{ м}$ (рис.5). Такой механизм образования длительных понижений уровня после сильных землетрясений подтверждается лабораторными экспериментами по декольматации трещины при сейсмических колебаниях [Кочарян и др., 2011].

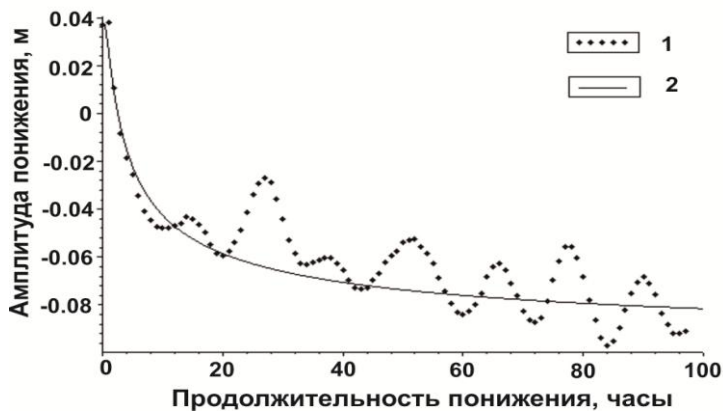
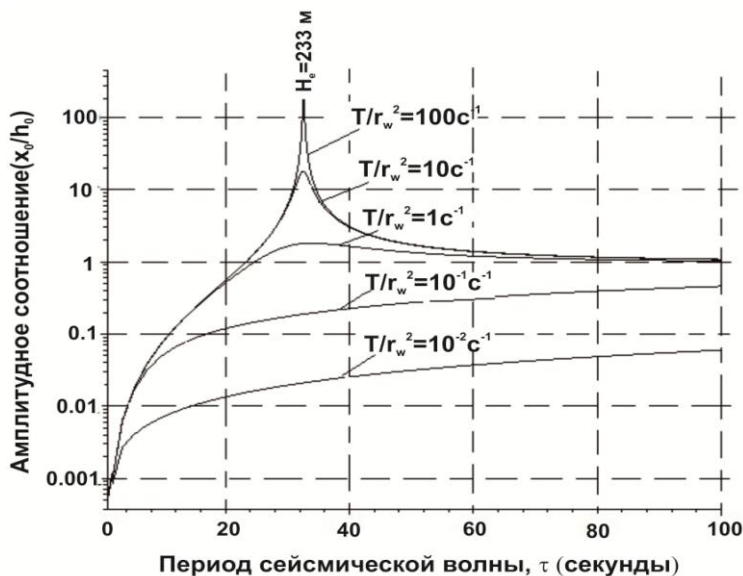


Рис. 5 - Результаты моделирования понижения уровня воды в скважине 1309 после Олюторского землетрясения 20.04.2006 г.: 1 – экспериментальные данные понижения уровня воды; 2 – теоретическое понижение уровня воды.

Отклонения фактического понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис.7) в течение первых десятков суток от расчетной зависимости, возможно, связано с действием не одного, а нескольких источников разнонаправленного изменения порового давления. Восстановление уровня

воды в скв. ЮЗ-5 после КЗ в течение двух лет после достижения минимума (рис.7) обусловлено релаксацией порового давления за счет высокой стабильности гидрогеодинамического режима напорных подземных вод. Колебания уровня воды в обеих скважинах возникают, в основном, вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в стволе скважины при прохождении поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений (14) с периодами 44.6 с для скв. ЮЗ-5 и 33 с для скв. 1309 [Копылова, Болдина, 2007; Болдина, Копылова, 2007].

Теоретические оценки возникновения затухающих осцилляций уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис.7) с периодом $\tau \approx 44$ с и в скв. 1309 (рис.6) с периодом $\tau \approx 33$ с вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в системе «скважина - водовмещающая порода» при воздействии сейсмических волн показали, что такие изменения уровня воды могут возникать при величине T/r_w^2 не менее 1 с^{-1} . Эта величина превышает на два порядка аналогичную величину,



полученную по приливному и барометрическому откликам уровня воды и по данным откачки из скважин (для скв. ЮЗ-5 $T/r_w^2 \leq 1.0-2.8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, для скв. 1309 $T/r_w^2 \leq 1.0-1.8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$). Для объяснения эффекта увеличения водопроницаемости привлекаются данные физического эксперимента [Шмонов и др., 2002].

Рис. 6 - Изменение амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скв. 1309 и изменением напора в водовмещающих породах x_0/h_0 в зависимости от параметра системы «скважина – водовмещающая порода» T/r_w^2 и периода сейсмической волны τ .

ГЛАВА 4. «ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ «СКВАЖИНА – ВОДОВМЕЩАЮЩАЯ ПОРОДА»». Рассмотрены этапы построения модели гидрогеодинамических процессов формирования разнообразных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в системе «скважина – водовмещающая порода» при различных механизмах сейсмического воздействия на примере скв. ЮЗ-5 и 1309. Продемонстрирована возможность количественной оценки объемной деформации водовмещающих пород по данным уровневых наблюдений в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды на примере скв. Е-1.

В основу разработки модели гидрогеодинамических процессов формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в системе «скважина – водовмещающая порода» [Болдина, Копылова, 2009] (рис.7) положены:

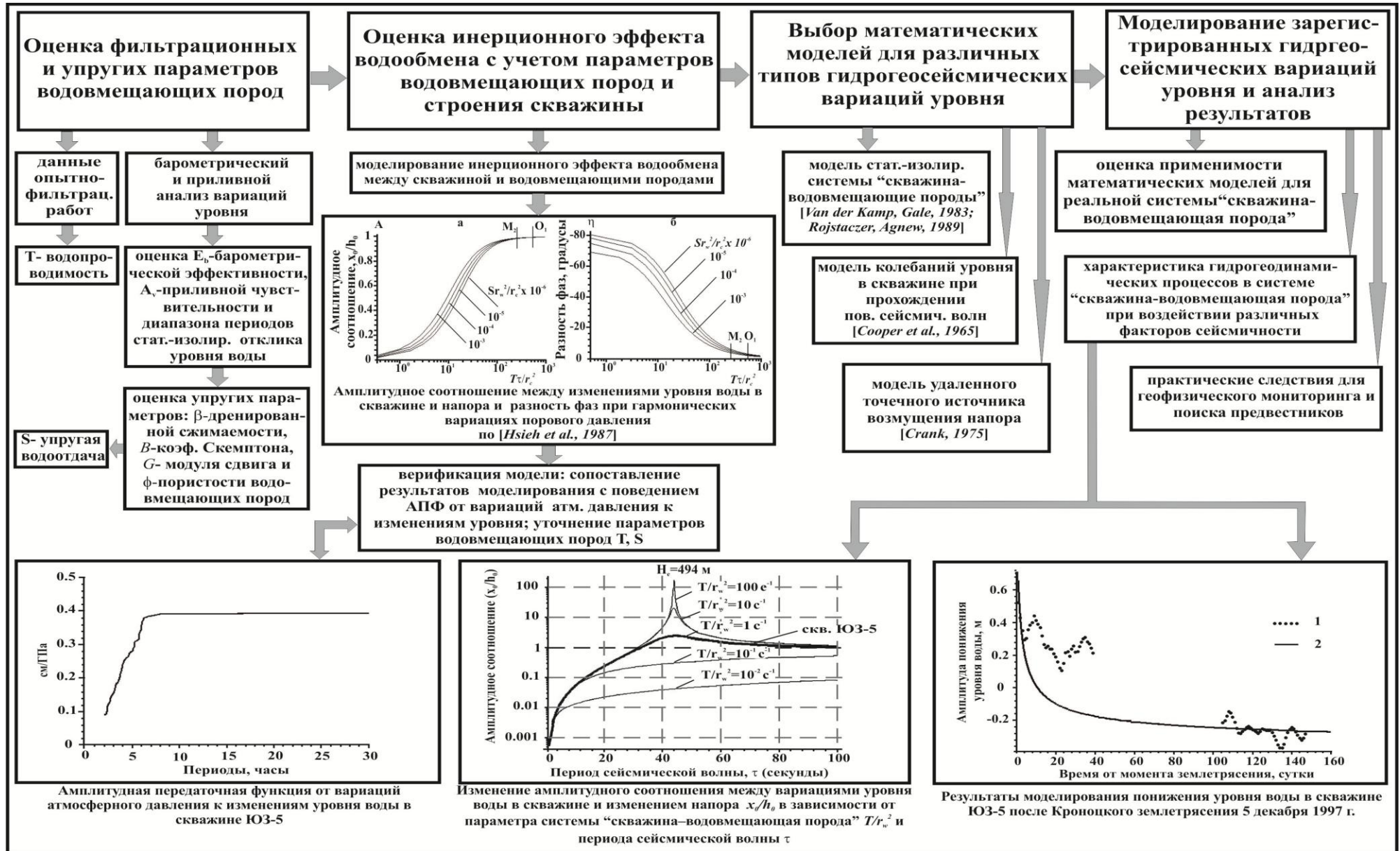


Рис.7 – Схема построения модели гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающие породы» при воздействии сейсмичности (на примере скважины ЮЗ-5) [Болдина, Копылова, 2009].

- выявленные четыре типа гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 [Копылова, 2006];
- результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления и оценка величины барометрической эффективности;
- результаты приливного анализа вариаций уровня воды по программе ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994] и оценки величин приливной чувствительности уровня по отношению к теоретической деформации;
- приложения теории пороупругости [Rice, Cleary, 1976] для статически изолированных систем «скважина – водовмещающая порода» [Rojstaczer, Agnew, 1989 и др.]; оцененные упругие параметры и пористость водовмещающих пород;
- результаты обработки данных опытно-фильтрационных работ для уточнения величины водопроницаемости водовмещающих пород;
- математическая модель инерционности водообмена между скважиной и водовмещающими породами при гармонических вариациях порового давления [Hsieh et al., 1987];
- математическая модель [Cooper et al., 1965], описывающая отклик уровня воды в скважине на прохождение поверхностных сейсмических волн;
- решение одномерного уравнения математической теории диффузии для удаленного точечного источника возмущения [Карслоу, Егер, 1964; Crank, 1975];
- результаты математического моделирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 и 1309 [Болдина, Копылова, 2006, 2007, 2008, 2009; Копылова, Болдина, 2007, 2012а,б].

На рис.7 представлены основные этапы построения модели и содержание каждого из этапов.

Первый этап – оценка фильтрационных и упругих параметров вскрытых скважиной водовмещающих пород по данным опытно-фильтрационных работ и использования результатов барометрического и приливного анализа уровня воды.

Второй этап – оценка параметров инерционности водообмена между скважиной и вскрытыми ею водовмещающими породами с использованием математической модели [Hsieh et al., 1987] и верификация результатов моделирования по АПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважине.

Третий этап – выбор математических моделей для описания зарегистрированных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в рассматриваемой скважине.

Четвертый этап включает моделирование зарегистрированных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине и анализ результатов моделирования.

Результатами четвертого этапа являются выводы о характере гидрогеодинамических процессов, формирующих соответствующие типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, и практические следствия анализа таких вариаций уровня воды для геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений, включающие количественные оценки и качественные заключения об изменениях НДС геологической среды в районе скважины.

На основе полученной феноменологической модели (рис.7) объясняются гидрогеодинамические процессы формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, зарегистрированных в скважинах ЮЗ-5 и 1309:

- гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения и косейсмические скачки уровня при сильных местных землетрясениях, зарегистрированные в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, объясняются неискаженной упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород;

- постсейсмическое понижение уровня воды после Кроноцкого землетрясения в скважине ЮЗ-5 и после Олюторского землетрясения в скважине 1309 могло быть вызвано падением напора в водовмещающих породах на некотором удалении от скважин вследствие локального улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях;

- колебания уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1309 возникают, в основном, вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в стволе скважины при прохождении поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений с периодами 44.6 с для скважины ЮЗ-5 и 33 с для скважины 1309. Обнаружен эффект кратковременного улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении таких волн.

Применение предложенной модели для скважины Е-1 вызвало необходимость ее адаптации для условий, когда в изменениях уровня воды не проявляется реакция на земные приливы и поэтому невозможно определить величину приливной чувствительности уровня воды. Особенности скважины Е-1 также являются малая водопроницаемость водовмещающих пород и замедленный водообмен между скважиной и водовмещающими породами, а также повышенная сжимаемость подземной воды из-за присутствия газа в ее составе.

На примере скв. Е-1 (постепенное повышение порового давления в течение 2.5 лет вследствие деформации объемного сжатия водовмещающих пород (рис.2)) продемонстрирована возможность количественной оценки объемной деформации водовмещающих пород по данным уровневых наблюдений в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды [Копылова, Болдина, 2012а].

С учетом поведения АПФ от изменений атмосферного давления к изменениям уровня воды и обстановки застойных условий формирования гидрогеодинамического режима для скв. Е-1 принималась гипотеза о статически изолированных условиях в диапазоне периодов от двух суток до десятков-сотен суток.

Для оценки величины объемного сжатия использовалась формула связи изменений порового давления $\Delta p = \rho g \Delta h$ и объемной деформации $\Delta \varepsilon$ для статически изолированных условий [Roeloffs, 1988]

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)]\Delta \varepsilon. \quad (18)$$

Величина ν_u принималась равной 0.3, что является традиционным допущением для водоносных горизонтов в верхней части земной коры.

Такая связь определяется упругими параметрами водовмещающих пород: ν_u , G и B . При недренированных условиях расчет упругих параметров G и B может проводиться по формулам теории пороупругости с использованием величин приливной чувствительности уровня воды A_s и A_v , полученным по результатам приливного анализа и величинах β , β_u и β_f . Для определения величины B могут использоваться формулы [Igarashi, Wakita, 1991; Rojstaczer, Agnew, 1989]:

$$B = \rho g A_s \beta / 1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u), \quad (19)$$

$$B = (\beta - \beta_u) / (\beta - \beta_u) + \phi (\beta_f - \beta_u), \quad (20)$$

$$B = \rho g \beta_u A_v, \quad (21)$$

где ϕ – пористость, принималась равной 0.05 по аналогии с величиной пористости водовмещающих пород, вскрытых скв. 1303 (табл. 1,2); $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц).

Для грубой оценки деформометрической чувствительности уровня в скважине использовались данные по проявлению гидрогеодинамического предвестника КЗ в скв. Е-1 и ЮЗ-5 (рис. 1А) $\Delta h^{ЮЗ-5} / A_v^{ЮЗ-5} = \Delta h^{Е-1} / A_v^{Е-1}$. Амплитуды понижения уровней Δh составили в скв. ЮЗ-5 – 11 см, в скв. Е-1 – 1 см (рис. 1А). Отсюда величина A_v составляет примерно $0.015 \text{ см}/10^{-9}$, а $A_s = 0.010 \text{ см}/10^{-9}$ [Копылова, Болдина, 2012а,б; Болдина, Копылова, 2008].

Величины сжимаемости порово-трещинного флюида β_f и упругой водоотдачи S оценивались по результатам моделирования восстановления уровня воды после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины 11.03.2009 г., сопровождающийся повышением уровня воды на 13 см с последующей его стабилизацией в течение 44 сут (рис. 2а) [Копылова, Болдина, 2012а,б].

По результатам моделирования (рис. 8) наиболее приемлемой величиной сжимаемости подземной воды при $T = 0.004 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 5.8 \cdot 10^{-5}$ является $\beta_f = 4.4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$. Такая величина β_f на порядок больше, чем сжимаемость обычной воды, и указывает на небольшое содержание свободного газа в порово-трещинном пространстве водовмещающей породы. Величина сжимаемости скелета породы β (табл. 2) получена из формулы $S = d[\rho g(\beta + \phi \beta_f)]$, где d – мощность водовмещающих пород, равная 22 м. При этом величина $\beta = 7.4 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$, полученная для скв. 1303 (табл. 2), использовалась в качестве начального приближения при оценке величины упругой водоотдачи водовмещающих пород, вскрытых скв. Е-1. Величина пористости ϕ принималась равной не более 0.06 также по аналогии с величиной пористости водовмещающих пород, вскрытых скв. 1303 (табл. 2). Следует отметить, что величина водопроницаемости T хорошо

согласуется с полученной ранее, по результатам экспресс-налива в 1991 г. [Копылова, Болдина, 2012а,б].

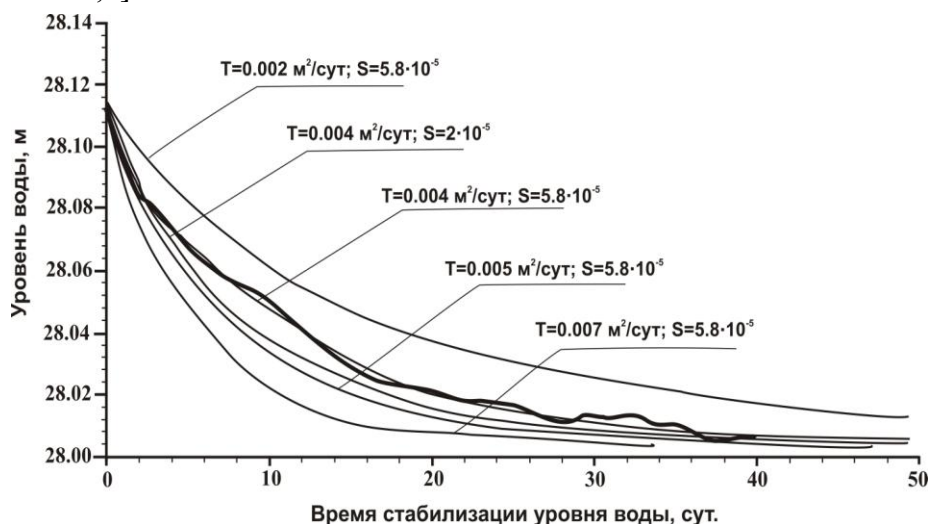


Рис. 8 - Стабилизация уровня воды в скважине Е-1 после спуска датчика акустической эмиссии в ее ствол: жирной линией показано изменение уровня воды по данным 10-минутных измерений, тонкими линиями показаны расчетные понижения уровня воды при различных величинах водопроницаемости T и упругой емкости S .

С использованием (19) - (21) получена оценка величины B в диапазоне значений 0.04 – 0.17, в среднем, 0.09 [Копылова, Болдина, 2012а]. Модуль сдвига G в (18) определялся по формуле (5) [Van der Kamp, Gale, 1983]. С использованием (18) и оцененных упругих параметров водовмещающих пород, вскрытых скв. Е-1 (табл. 2) приблизительная величина деформации объемного сжатия в течение времени аномального повышения уровня воды составила в районе скв. Е-1 $\Delta\varepsilon = -(4.1 \cdot 10^{-6} - 1.5 \cdot 10^{-5})$ [Копылова, Болдина, 2012а]. Приведенные величины $\Delta\varepsilon$ имеют оценочный характер, т. к. при их получении использовались ряд гипотетических предположений, в частности, о примерном равенстве величин объемной деформации в районах скв. ЮЗ-5 и Е-1 на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения, о примерном соответствии величин пористости и сжимаемости скелета водовмещающей породы в скв. 1303 и Е-1.

Наиболее вероятным источником деформации сжатия являются тектонические напряжения, связанные с формированием субмеридиональной раздвиговой зоны в земной коре в районе влк. Корякский [Копылова, Болдина, 2012а; Гордеев, Дроздин, 2010; Селиверстов, 2009; Сенюков, Нуждина, 2010]. Вследствие действия источника объемного сжатия и роста порового давления в водовмещающих породах с середины 2007 по 2009 гг., т.е. в течение 2.5 лет, наблюдалось понижение чувствительности гидродинамического режима скв. Е-1 к процессам подготовки сильных тектонических землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является рассмотрение гидрогеодинамических процессов формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, зарегистрированных в пьезометрических скважинах Камчатки в рамках созданной феноменологической модели поведения системы «скважина – водовмещающая порода» при различных механизмах сейсмического воздействия, включающих:

- статически изолированный отклик уровня воды (порового давления) на упругую деформацию водовмещающих пород при изменении их напряженного состояния на ко- и предсейсмических стадиях сильных землетрясений;
- эффект усиления вариации порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении низкочастотных сейсмических волн с частотами, соответствующими резонансной частоте скважины;
- постсейсмическое падение напора (порового давления) в окрестности скважины в результате комплексного воздействия сильного землетрясения на состояние водовмещающих пород.

Для создания феноменологической модели процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в системе «скважина – водовмещающая порода» были решены следующие научные задачи:

1. По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скв. Е-1, ЮЗ-5, 1303 и 1309 исследован барометрический отклик уровня в зависимости от периода вариаций и выполнена оценка величины барометрической эффективности E_b в диапазоне часовых-суточных периодов.

Обоснована гипотеза о статически изолированных условиях в водовмещающих породах, вскрытых скважинами ЮЗ-5, 1303 и 1309.

2. На основании приливного анализа данных уровневых наблюдений на скв. ЮЗ-5, 1303 и 1309 (с использованием программы ETERNA 3.0) оценены величины приливной чувствительности по отношению к площадной деформации A_s для каждой из скважин.

Особенности барометрического отклика и отсутствие приливного отклика уровня воды в скв. Е-1 обусловлены наличием газа в поровом флюиде, а также затрудненной связью между водовмещающими породами и стволом скважины.

3. На основании полученных величин приливной чувствительности уровня воды и барометрической эффективности для скв. ЮЗ-5, 1303 и 1309 оценены величины сжимаемости скелета породы β , коэффициента Скемптона B , удельной упругой емкости S_s и пористости ϕ , удовлетворяющие ограничениям, полученным для этих величин из анализа связи упругих параметров водовмещающих пород и величин E_b и A_s при статически изолированных условиях. Полученные величины хорошо согласуются с данными петрофизических исследований пород и расчетов для водовмещающих пород, сложенных песчаниками [Van der Kamp, Gale, 1983].

4. На основе модели инерционного водообмена между скважиной и водовмещающими породами построены теоретические зависимости отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5, 1303 и 1309 на периодические изменения порового давления в водовмещающих породах в диапазоне минутных и часовых периодов, учитывающие геометрию скважин, упругие и фильтрационные параметры водовмещающих пород; оценены параметры инерционности водообмена между скважинами и водовмещающими породами.

Результаты моделирования согласуются с изменением АПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважинах и показывают, что на периодах, соответствующих диапазону действия приливных и медленных сейсмотектонических вариаций НДС водовмещающих пород (десятки часов - сутки), искажение отклика уровня воды в скважинах на изменения порового давления не ожидается.

Научные результаты, полученные на основе созданной модели:

1. Гидрогеодинамический предвестник КЗ и косейсмические скачки уровня при сильных местных землетрясениях в скв. ЮЗ-5 объясняются неискаженной упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород.

Определены характер и величины объемной косейсмической и предсейсмической деформации в районе скважины по амплитудам аномального изменения уровня воды и величине его приливной чувствительности:

- для шести землетрясений оценены величины косейсмической деформации водовмещающих пород ($D_1=75-1.6 \cdot 10^{-9}$), а также характер деформации по направлению изменения уровня воды. Показано, что полученные оценки косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений на скв. ЮЗ-5, в основном, согласуются по знаку и по амплитуде с теоретическими оценками по модели протяженного источника дислокации в однородном упругом полупространстве [Okada, 1985]. Некоторое различие в величинах косейсмических объемных деформаций, полученных по обоим методам, определяются ошибками их определения, присущих обоим методам. Оценены параметры землетрясений (соотношение энергетических характеристик - магнитуда, энергетический класс, и гипоцентральное расстояние), сопровождающиеся косейсмическими скачками уровня воды в скв. ЮЗ-5;

- по амплитуде понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 перед КЗ получена оценка величины деформации расширения водовмещающих пород на стадии его подготовки $0.7 \cdot 10^{-7}$.

2. Постсейсмическое понижение уровня воды в скв. ЮЗ-5 после КЗ и в скв. 1309 после Олюторского землетрясения могло быть вызвано падением напора на некотором удалении от скважин вследствие локального улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях. Такой механизм образования длительных понижений уровня после сильных землетрясений подтверждается лабораторными экспериментами по декольматации трещины в образце при сейсмических колебаниях [Кочарян и др., 2011].

Оценен радиус чувствительности скважин к источнику падения напора. Для скв. ЮЗ-5 он составил $R=450$ м, а для скв. 1309 - $R=190$ м.

3. Колебания уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1309 при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений возникают, в основном, вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в стволе скважины. Оценены резонансные периоды для скв. ЮЗ-5 $\tau \approx 44$ с и для скв. 1309 $\tau \approx 33$ с.

Предложена гипотеза, объясняющая временное улучшение фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении поверхностных сейсмических волн за счет нарушения структуры трещинно-порового пространства и резкого увеличения проницаемости [Шмонов и др., 2002]. Для проверки этой гипотезы необходимо совершенствование системы уровнемерных наблюдений на скважинах и проведение проверочного эксперимента.

Впервые построенная феноменологическая модель гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая порода» при различных механизмах сейсмического воздействия применена к реальным пьезометрическим скв. ЮЗ-5 и 1309. В дальнейшем она может привлекаться для интерпретации текущих данных уровнемерных наблюдений в скважинах сейсмоактивных районов в целях мониторинга НДС среды.

На примере скв. Е-1 продемонстрирована возможность количественной оценки объемной сейсмоструктурной деформации водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды. С учетом оцененных упругих параметров водовмещающих пород на основе моделирования восстановления уровня после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины по амплитуде повышения уровня воды в течение времени с 20 мая 2006 по декабрь 2009 гг. оценена величина деформации объемного сжатия в районе скв. Е-1 $\Delta \varepsilon = -(4.1 - 9.9) \cdot 10^{-6}$ на стадии подготовки и реализации роя землетрясений в районе вулкана Корякский и его фреатическом извержении.

Научные результаты работы существенно дополняют и расширяют представления о гидрогеодинамических процессах, происходящих в системах «скважина – водовмещающая порода» под влиянием сейсмичности, и направлены на развитие научно-методических основ гидрогеодинамического метода мониторинга НДС земной коры в сейсмоактивных регионах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Болдина С.В.** Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2004. № 2. Вып. № 4. С. 109-119.

2. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2006. № 2. С. 17–28.

3. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2006. № 2. Вып. № 8. С. 112-119.

4. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., $M=9.3$ // Вулканология и сейсмология, 2007. № 5. С. 39–48.

5. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Оценка косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении 5.12.1997 г., $M_w=7.8$ по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2008. № 2. Вып. № 12. С. 95-102.

6. Копылова Г.Н., Горбунова Е.М., **Болдина С. В.**, Павлов Д.В. Оценка деформационных свойств системы «пласт-скважина» на основе анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине // Физика Земли, 2009. № 10. С. 69-78.

7. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., **Болдина С.В.**, Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли, 2010. № 1 С. 51-61.

8. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. И сильными ($M \geq 5$) землетрясениями. // Вулканология и сейсмология, 2012. № 5. С. 41-54.

9. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w=7.8$ // Тихоокеанская геология, 2012. № 5. С. 104-114.

10. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. О возможности получения оценок упругих параметров водовмещающих пород по данным равномерных наблюдений в пьезометрических скважинах // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2013. № 2. Вып. № 22. С. 184-195.

Другие публикации

11. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным равномерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 405–421.

12. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 на Суматранское землетрясение 26 декабря 2004г., $M=9$ // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. С. 140-147.

13. **Болдина С.В.** Теория пороупругости и ее применение для описания поведения систем скважина-резервуар при изменении напряженно-деформированного состояния среды // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Высшая школа как важнейший государственный ресурс регионального образования». Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2005. С. 6 – 21.

14. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина–резервуар (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Геофизический мониторинг Камчатки. Матер. научно-технической конференции КФ ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С. 122 – 130.

15. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Феноменологическая модель гидрогеодинамических процессов в системе скважина–резервуар при сейсмических воздействиях (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Подземная гидросфера. Матер. XVIII совещания по подземным водам Сибири и Дальнего востока. Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2006. С. 324-327.

16. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Гидрогеодинамические процессы в системе скважина-резервуар при сейсмических воздействиях (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Геофизика XXI столетия: 2007 год. Сб. трудов Девярых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2008. С. 23-35.

17. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 томах. Труды региональной научно-технической конференции. Том 1 / Отв. ред. В.Н. Чебров и В.А. Салтыков, Петропавловск-Камчатский 11-17 ноября 2007 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 50-54.

18. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., **Болдина С. В.**, Сдельникова И.А. Оценка косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений на Камчатской скважине ЮЗ-5 и моделирования // Тектоника и глубинное строение востока Азии: VI Косыгинские чтения: доклады всероссийской конференции, 20-23 января 2009, г. Хабаровск / под ред. А.Н. Диденко, А.А. Степашко. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2009. С. 272-275.

19. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Модель гидрогеодинамических процессов в системе «пьезометрическая скважина - напорный резервуар пресных подземных вод» при сейсмических воздействиях // Подземные воды востока России. Матер. Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XIX совещания по подземным водам Сибири и Дальнего востока). Тюмень: Тюменский дом печати, 2009 С. 425-429.

20. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Моделирование гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. Том 1/ Отв. ред. В.Н. Чебров и В.А. Салтыков, Петропавловск-Камчатский 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 166-170.

21. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w=7.8$ // Материалы научного симпозиума «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири», 1-4 июня 2010 г. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 249–252.

22. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Равномерные наблюдения в скважинах при проведении мониторинга деформационных процессов в сейсмоактивных регионах // Материалы Пятой Международной сейсмологической школы. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 102-106.

23. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.**, Сизова Е.Г. О проявлении эффектов сильных ($M \geq 5$) субдукционных землетрясений и локальных геодинамических процессов в изменениях уровня воды в скважине Е-1, Камчатка // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский 9-15 октября 2011 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 217-221

24. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. О связи барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды в пьезометрической скважине с упругими параметрами резервуара подземных вод // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы международной конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 44-46.

25. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Оценка деформометрических свойств скважины Е-1, Камчатка // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С.178-182.

26. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.**, Сизова Е.Г. Изменения уровня воды в скважине Е-1 в связи с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога 30 марта – 1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 90-95.

27. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.**, Смолина Н.Н., Сизова Е.Г., Касимова В.А. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки (по данным наблюдений 1987-2011 гг.) / Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2012. С. 236–269.

28. Копылова Г.Н., Сизова Е.Г., Смолина Н.Н., **Болдина С.В.** Прецизионные уровнемерные наблюдения в скважинах Камчатки: Достижения и проблемы // Подземная гидросфера. Материалы XX Всероссийского совещания по подземным водам востока России, г. Иркутск 18-22 июня 2012 г. Иркутск: ООО «Географ», 2012, С. 330-334.

29. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Оценка деформации водовмещающих пород при активизации современных геодинамических процессов (по данным уровнемерных наблюдений на скважинах Камчатки) // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Т. 2. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. С. 148-151.

30. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.** Многолетние прецизионные уровнемерные наблюдения на скважинах Камчатки: база данных и гидрогеосейсмические вариации уровня воды // Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии. Матер. всероссийской научно-практической конференции (25-27 сентября 2013). Москва: АНО УКЦ «Изыскатель», 2013. С. 42-44.

31. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.**, Сизова Е.Г. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки в период землетрясения 28 февраля 2013 г., $M_w=6.9$ // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Седьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. С.156-158.

32. **Болдина С.В.**, Копылова Г.Н. Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г., $M=6.8$ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский 29 сентября-5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 435-439.

33. Копылова Г.Н., **Болдина С.В.**, Сизова Е.Г. Наблюдения в пьезометрических скважинах / Сильные камчатские землетрясения 2013 года. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2014. С. 102–108.