

## Глава 9

# **ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ВОДЫ В ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ КАМЧАТКИ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 1987–2011 гг.)**

### **Введение**

Проведение уровнемерных наблюдений в пьезометрических скважинах с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений является одним из приоритетных направлений исследований по проблеме сейсмического прогноза. Большой вклад в развитие методологии таких исследований внесли отечественные ученые из Института физики Земли РАН (И. Г. Киссин), ВСЕГИНГЕО (Г. С. Вартамян, Г. В. Куликов), Сахалинского комплексного научно-исследовательского института ДВНЦ АН СССР и др.

Результаты уровнемерных наблюдений 70–80-х гг. XX в. в сейсмоактивных районах СССР и мира представлены в множестве публикаций, в которых сообщалось об обнаружении различных видов гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Вместе с тем сейсмопрогностическая информативность выявленных эффектов в изменениях уровня воды не оценивалась. Это было обусловлено объективными недостатками используемых данных наблюдений, которые имели в основном, фрагментарный, несистематический характер. Кроме этого в то время не было в достаточной степени разработано научное обоснование методических вопросов проведения наблюдений и обработки уровнемерных данных для выявления гидрогеодинамических предвестников; теоретические положения об их формировании имели преимущественно гипотетический характер и основывались на общих представлениях о связи изменений напряженно-деформированного состояния водонасыщенных горных пород и режима подземных вод. По данным, представленным в работе [42], не менее 80–90 % эффектов в

подземных водах, которые первоначально относились к предвестникам, впоследствии были признаны проявлениями воздействия других факторов, в частности, осадков, либо артефактами. Поэтому вопрос о достоверности гидрогеодинамических предвестников, их особенностях и масштабах проявления в зависимости от параметров землетрясений, является открытым до настоящего времени.

Фактор влияния сейсмичности на режим подземных вод, рассматриваемый как совокупность отдельных землетрясений и процессов их подготовки, воздействует на подземные воды за счет изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих горных пород. Собственно землетрясение, включающее образование разрыва и излучение упругих сейсмических волн, имеет малую продолжительность (секунды – минуты – десятки минут). При этом происходят изменение статического напряженного состояния среды в окрестностях очага и динамическая деформация насыщенных горных пород, сопровождающиеся ко- и постсейсмическими изменениями в режиме подземной гидросферы. По современным представлениям процесс подготовки сильного землетрясения развивается длительное время, составляющее месяцы – годы – десятилетия, и может сопровождаться изменением упругого состояния насыщенных горных пород, развитием в них трещинной дилатансии, а также миграцией и фазовыми изменениями поровых флюидов, перераспределением их давления. Эти процессы вызывают изменения гидродинамических и физико-химических параметров режима скважин и источников, которые можно надежно зафиксировать только при проведении специализированных наблюдений.

Необходимым этапом развития метода равномерных наблюдений в целях прогноза землетрясений является достоверная диагностика изменений уровня воды под влиянием процессов подготовки и реализации землетрясений или *гидрогеосейсмических* вариаций с указанием их форм, амплитуд и продолжительностей. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды могут служить показателями деформометрической чувствительности отдельных скважин [17, 18]. Они также являются единственными доступными для изучения проявлениями специфических гидрогеодинамических процессов в реальных системах «скважина – резервуар» под воздействием факторов сейсмичности. Математическое моделирование достоверно выявленных гидрогеосейсмических вариаций с учетом фильтрационных и упругих параметров резервуара, технического строения скважины, эффекта инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод является наиболее эффективным способом описания таких процессов в системах «скважина – резервуар» [3–8].

Актуальными научными задачами развития метода уровневых наблюдений на современном этапе являются:

– установление закономерностей и особенностей проявления гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, в первую очередь гидрогеодинамических предвестников в зависимости от параметров землетрясений и локальных гидрогеологических условий;

– разработка методологии построения моделей гидрогеодинамических процессов в реальных системах «скважина – резервуар подземных вод» под влиянием сейсмических факторов и оценки деформометрических свойств наблюдательных скважин;

– оценка информативности гидрогеодинамических предвестников для прогноза землетрясений.

Основу решения этих задач составляют систематизация и обобщение данных многолетних специализированных уровневых наблюдений в пьезометрических скважинах в сейсмоактивных регионах.

На Камчатке уровневые наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений проводятся с 1978 г. В 1978–1986 гг. Институтом вулканологии ДВНЦ АН СССР и Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) 8 скважин в районе г. Петропавловска-Камчатского и пос. Паужетка были оборудованы поплавковыми самописцами уровня воды «Валдай» и ГР-38 с недельным часовым заводом и записью вариаций уровня на бумагу [9]. На скважинах также проводилась регистрация атмосферного давления с помощью барографов и еженедельный контроль глубины уровня воды гидрогеологической хлопущкой. Точность регистрации уровня составляла  $\pm 1.0 - 0.5$  см, атмосферного давления – 1 гПа. В результате были получены непрерывные недельные записи уровня воды по ряду скважин, но принятая периодичность представления уровневых данных в 1978–1993 гг. составляла один раз в сутки. Суточные данные уровневых наблюдений на скважинах НИС-1 и Е-1 с 1982 по первую половину 1993 гг. опубликованы в ежеквартальных Бюллетенях Камчатского полигона по прогнозу землетрясений и извержений вулканов, выпуски которых осуществлялись КОМСП.

На основе применения такой упрощенной методики получены временные ряды суточных изменений уровня воды, в которых фиксировались сезонные и барометрические вариации, техногенные эффекты эксплуатации Паужетского месторождения термальных вод. Гидрогеосейсмические вариации выявлены ретроспективно только в изменениях уровня воды в скважине Е-1 [12].

Новый этап развития уровневых наблюдений на Камчатке связан с реализацией федеральной целевой программы развития сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (ФЦП «Развитие ФССН

в 1995–2000 гг.»). Наблюдения на пьезометрических скважинах были включены в перечень комплексных наблюдений, направленных на обеспечение прогноза сильных камчатских землетрясений. В табл. 1 отражены основные мероприятия по развитию наблюдательной сети и методики обработки данных уровнемерных наблюдений в 1987–2011 гг.

В 1996–1997 гг. скважины Е-1 и ЮЗ-5 были оборудованы системами цифровой регистрации уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 10 мин. и накоплением данных на твердотельную память [1, 12, 14, 27, 28]. В этих работах принимал участие Институт физики Земли РАН, предоставивший два комплекта аппаратуры в составе дифференциальных датчиков давления с частотным выходом ДА, ДУ и геофизического измерительного прибора ГИП-З. Применение системы цифровой регистрации уровня воды и атмосферного давления обеспечивало чувствительность регистрации изменений уровня воды  $\pm 0.2$  см, атмосферного давления –  $\pm 0.1$  гПа.

В 2000–2001 гг. система наблюдений на скважинах Е-1 и ЮЗ-5 была модернизирована путем замены технически устаревшей аппаратуры универсальным регистратором Кедр-А2 с ультразвуковым датчиком уровня воды и датчиком атмосферного давления (ООО «Полином», г. Хабаровск). Применение этой аппаратуры повысило точность измерений вариаций уровня воды до  $\pm 0.1$  см, атмосферного давления –  $\pm 0.2$  гПа. Обеспечение непрерывных наблюдений на скважинах Е-1 и ЮЗ-5 с 1996 г. по настоящее время осуществляется группой геофизических наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). Основной объем работ по оборудованию скважин и по проведению наблюдений выполнен А. А. Смирновым. Сбор и обработка уровнемерных данных проводятся в лаборатории геофизических исследований КФ ГС РАН под руководством д.г.-м.н. Г. Н. Копыловой.

В 2005–2006 гг. на четырех скважинах ОАО «Камчатгеология» также были организованы цифровые уровнемерные наблюдения с периодичностью 10 мин с использованием системы Кедр А2 (ранее с 2001 г. регистрация уровня воды и атмосферного давления на скважинах ОАО «Камчатгеология» осуществлялась с периодичностью одно измерение в час).

Увеличение потока данных, поступающих с наблюдательных скважин, требовало создания автоматизированных средств сбора, обработки и анализа данных наблюдений. В 2002 г. в практику работ КФ ГС РАН внедрены программные средства информационной системы «POLYGON», реализованной в рамках архитектуры клиент-сервер на базе СУБД MySQL и предназначенной для обеспечения автоматизированного пополнения централизованной базы данных комплексных геофизических наблюдений, их хранения, обработки и оперативного анализа [24, 26].

Таблица 1. Развитие сети и методики обработки данных уровнемерных наблюдений на Камчатке, 1987–2011 гг.

Дата	Содержание работ	Организация
1987 г.	Организация уровнемерных наблюдений на скв. Е-1 с использованием поплавкового самописца «Валдай», периодичность регистрации 1 раз в сутки.	КОМСП
Январь 1996 г.	Организация цифровой регистрации уровня воды на скв. Е-1 (периодичность 10 мин) с использованием регистратора ГИП-3 и датчика уровня ДУ.	КЦМСиВА, ИФЗ
Сентябрь 1997 г.	Организация цифровой регистрации уровня воды на скв. Ю3-5 (периодичность 10 мин) с использованием регистратора ГИП-3 и датчика уровня ДУ.	КЦМСиВА, ИФЗ
2001-2002 гг.	Модернизация системы уровнемерных наблюдений на скв. Е-1 и Ю3-5; установка регистраторов Кедр-А2 и ультразвуковых датчиков уровня воды (ООО Полюном, г. Хабаровск); периодичность регистрации 10 мин;	КОМСП
	- организация цифровых уровнемерных наблюдений на сети скважин ОАО «Камчатгеология» (скв. 1303, 1306, 1309, 1311);	КГ
	- внедрение программных средств информационной системы POLYGON для сбора, хранения и обработки данных уровнемерных наблюдений [24, 26].	КОМСП
2004 г.	Создание методики обработки данных уровнемерных наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды [12, 14, 23, 25].	КОМСП
2005-2006 гг.	Организация цифровых уровнемерных наблюдений на скважинах ОАО «Камчатгеология» с периодичностью 10 мин	КГ
2007-2010 гг.	Модернизация системы уровнемерных наблюдений на четырех скважинах ОАО «Камчатгеология»; использование регистраторов Кедр-Д, Кедр ДМ v2 и телеметрической передачи данных (ООО Полюном, г. Хабаровск).	КГ
2011 г.	Модернизация системы уровнемерных наблюдений на скв. Ю3-5; использование регистратора Кедр ДМ и телеметрической передачи данных, периодичность регистрации 5 мин.	КФ ГСРАН

Примечание: КОМСП – Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия (с 2004 г. – Камчатский филиал Геофизической службы РАН – КФ ГС РАН); КЦМСиВА – Камчатский центр мониторинга сейсмической и вулканической активности; ИФЗ – Институт физики Земли РАН, г. Москва; КГ – ОАО «Камчатгеология».

В составе ИС «POLYGON» входит программа DIAGNOS, предназначенная для визуализации, обработки и анализа временных рядов данных наблюдений [1, 24, 26]. В программу интегрирован алгоритм компенсации влияния факторов-помех на изменения исследуемого ряда [36], с использованием которого осуществляется компенсация баровариаций в изменениях уровня воды.

В настоящей работе приводится характеристика скважин и методики обработки уровнемерных данных, рассматриваются основные типы выявленных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды. На основании результатов уровнемерных наблюдений в Камчатском регионе в 1987-2011 гг. дана предварительная оценка сейсмопрогностической информативности гидрогеодинамических предвестников землетрясений.

### **Наблюдательная сеть**

На рис. 1 приводится схема расположения шести скважин, в кото-

рых проводились 10-минутные наблюдения за изменениями уровня воды и атмосферного давления и были зарегистрированы различные типы гидрогеосейсмических вариаций. В табл. 2 дана гидрогеологическая и техническая характеристика наблюдательных скважин. Водопроницаемость водовмещающих пород Т оценивалась по данным откачек и экспресс-наливов в скважины. Как следует из табл. 2, наблюдательные скважины различаются по техническому строению и водовмещающим породам, их фильтрационным свойствам. Все скважины вскрывают напорные подземные воды. Пять скважин контролируют резервуары, содержащие обычные слабоминерализованные подземные воды. Поровый флюид в резервуаре, вскрытом скв. Е-1, содержит воду и газ метаново-азотного состава.

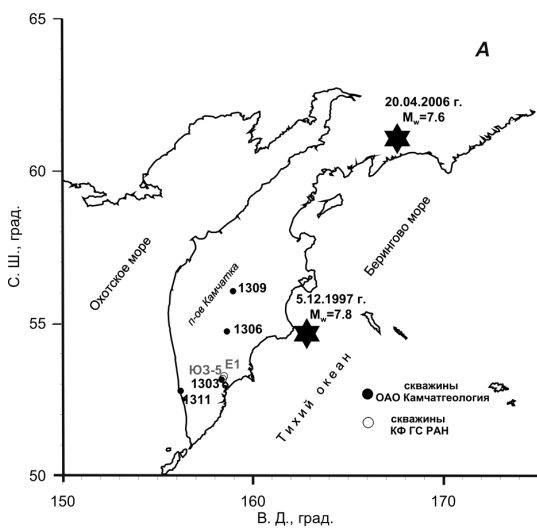
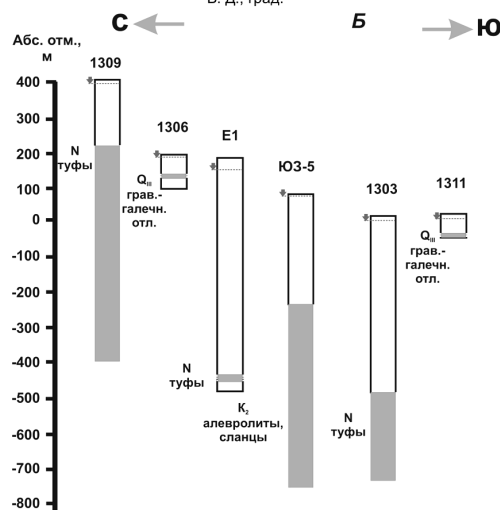


Рис. 1. Схемы расположения скважин (А) и их строение (Б): серым цветом выделены области связи стволов скважин с резервуарами подземных вод; вертикальные стрелки обозначают положение уровня воды в скважинах. Звезды показаны эпицентры землетрясений Кроноцкого 05.12.1997 г. и Олюторского 20.04.2006 г.



### Методика обработки данных

Режим подземных вод подвержен изменениям вследствие воздействия комплекса экзогенных и эндогенных факторов. По типу воздействия режимобразующих факторов на подземные воды наблюдаемые изменения подразделяются на две группы: 1) связанные с изменением количества и качества подземных вод в результате их естественного и искусственного питания или расходования (гидродина-

мические); 2) связанные с изменением напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород (геодинамические) [11, 37]. Гидрометеорологические факторы (выпадение осадков, таяние снега и др.) регулируют инфильтрационное питание подземных вод и по типу воздействия относятся к гидродинамическим. Сейсмичность и другие современные геодинамические процессы, приливные силы межпланетного взаимодействия, океаническая нагрузка, вариации атмосферного давления, нагрузочный эффект осадков и другие нагрузки на кровлю водоносного пласта оказывают геодинамическое воздействие на напорные подземные воды.

Данные равномерных наблюдений представляют временные ряды. Их обработка сводится к организации сбора, хранения, пополнения и представления данных наблюдений с применением компьютерных средств и к выделению полезных сигналов на фоне помех. В качестве полезных сигналов рассматриваются гидрогеосейсмические вариации уровня воды. В КФ ГС РАН сбор, хранение и визуализация равномерных данных осуществляется с использованием информационной системы «POLYGON» в составе базы данных наблюдений (БД) и программных средств для пополнения и ведения БД, обработки и графического представления данных [24, 26].

Гидрогеосейсмические вариации представляют сигналы в изменениях временных рядов уровня воды, вызванные отдельными, преимущественно сильными, землетрясениями. Поэтому анализ изменений уровня воды проводился во временных окнах длиной от суток до первых лет, включающих определенное землетрясение.

Важным принципом при выделении гидрогеосейсмических вариаций уровня воды является индивидуальный подход к обработке каждого временного ряда. Это объясняется особенностями формирования гидродинамического режима каждой скважины в многолетнем разрезе вследствие различия режимобразующих условий, а также особенностями изменения уровня под влиянием комплекса режимобразующих факторов. Возможность выделения гидрогеосейсмических вариаций также определяется степенью зашумленности временных рядов вследствие воздействия несейсмических факторов, а также чувствительностью и интервалом регистрации уровня воды. При проведении равномерных наблюдений с периодичностью 10 мин возможности для выделения сигналов сейсмического воздействия в высокочастотной области существенно расширяются.

В качестве помех рассматриваются изменения уровня воды, вызванные факторами несейсмической природы. Помехи условно разделяются на длиннопериодные (многолетний тренд, сезонность) и на относительно короткопериодные (барометрические вариации, эффекты осадков, приливные вариации и другие). Отсутствие техногенного влияния на

Таблица 2. Характеристика наблюдательных скважин

Скважина	Координаты, градусы		Глубина скважины/уровень, м	Радиус ствола в области колебаний уровня/ радиус в области связи с резервуаром, м	Диапазон глубин вскрытия резервуара/ длина открытой части ствола, м	Технические условия связи скважины и резервуара	Водовмещающие породы: возраст, состав, водопроницаемость Т, м <sup>2</sup> /сут	Поровый флюид
	с.ш.	в.д.						
1309	56.03	158.57	750/ 3.48	0.136/ 0.084	223-750/ 527	открытый ствол	N, туфы, 54	вода
1306	53.17	158.41	100/ 13.5	0.162/ 0.109	28-41/ 13	дырчатый фильтр	Q <sub>IV</sub> , гравийно-галечные отложения с прослоями глин и песков, 1451	вода
E1	53.26	158.48	665/ 28	0.109/ 0.109	625-645/ 20	дырчатый фильтр	N, туфы, 0.005	вода+газ N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>
ЮЗ-5	53.17	158.41	800/ 1.5	0.122/ 0.084	310-800/ 490	открытый ствол	K <sub>2</sub> , переслаивание алевролитов и аргеллитов, 7.8	вода
1303	53.08	158.21	800/ 25.3	0.122/ 0.046	517-717/ 200	открытый ствол	N, переслаивание туфопесчаников, туфобрекчий, туфоалевролитов, 0.32	вода
1311	52.47	156.12	80/ 11	0.084/ 0.073	67-69, 70-73/ 5	дырчатый фильтр	Q <sub>IV</sub> , щебнисто-гравийные отл. со ср/зернистым наполнителем, 165	вода

режим наблюдательных скважин позволяет рассматривать только естественные помехообразующие факторы.

Воздействие эндогенных и экзогенных факторов на состояние системы «скважина – резервуар» вызывает соответствующие отклики (сигналы) в изменениях уровня воды. Наиболее значимыми откликами несейсмической природы в изменениях уровня воды сопровождается барометрическое и приливное воздействие, а также нагрузочный эффект от выпадения осадков.

Исследование барометрического отклика уровня воды проводилось с использованием кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления [14, 23, 25 и др.]. Основной характеристикой барометрического отклика уровня воды является величина барометрической эффективности  $E_b$ , равная отношению амплитуды изменений уровня воды  $\Delta H$  к соответствующему изменению атмосферного давления  $\Delta P$ :  $E_b = \Delta H \gamma / \Delta P$ , где  $\gamma$  – объемный вес флюида [37].

Приливной анализ данных уровневых наблюдений проводился по программе ETERNA 3.0 [43] с определением амплитудных факторов для отдельных волн, и сдвига фаз между отдельными волнами в изменениях уровня воды, и соответствующими компонентами приливного гравитационного потенциала [13, 14, 23, 25].

Долговременные изменения уровня воды (тренд, сезонность) обычно связаны с процессами водного питания и передачи напора из областей питания в район скважины. Такие изменения учитывались качественно на основе результатов изучения годовых (сезонных) изменений уровня воды в отдельных скважинах по данным многолетних наблюдений [12, 14, 30].

Ниже рассматривается методика обработки данных уровневых наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды с учетом постоянно действующих факторов барометрической и приливной нагрузки, осадков и сезонности [14, 23, 25].

Введем обозначения временных рядов, которые характеризуют различные сигналы (рис. 3):  $A(t)$  – временной ряд изменений атмосферного давления;  $U(t)$  – временной ряд изменений уровня воды в скважине;  $U_k(t)$  – временной ряд изменений уровня воды с компенсированными баровариациями;  $U_b(t)$  – временной ряд барометрических вариаций уровня воды;  $U_{kt}(t)$  – временной ряд низкочастотного тренда в изменениях уровня воды;  $U_{kh}(t)$  – временной ряд высокочастотной составляющей вариаций уровня воды, содержащий приливные вариации и шум различного происхождения. Между временными рядами выполняются соотношения:  $U_b(t) = U(t) - U_k(t)$  и  $U_{kh}(t) = U_k(t) - U_{kt}(t)$ .

Компенсация баровариаций проводится на основе оценки комплексной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скользящем временном окне [36].  $U_{kt}(t)$  определяется как среднее значение  $U_k(t)$  в скользящем временном окне с заданным шагом по времени. Размер окна усреднения принимается таким, чтобы осуществлялось подавление земноприливных вариаций (диапазон их периодов составляет 12–27 ч) и не происходило искажение более низкочастотных вариаций уровня. Например, при интервале регистрации уровня воды и атмосферного давления, равным одному часу, оценка тренда производится в скользящем временном окне длиной 48 ч. с шагом 1 ч. При этом текущее значение  $U_{kt}(t)$  относилось на правый край временного окна для диагностики предвестниковых сигналов, не затухавших возможными ко- и постсейсмическими эффектами.

Полученные ряды  $U_k(t)$ ,  $U_{kt}(t)$ ,  $U_{kh}(t)$  используются для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, вызванных отдельными землетрясениями. Наиболее сложным моментом в анализе рядов  $U_{kt}(t)$  яв-

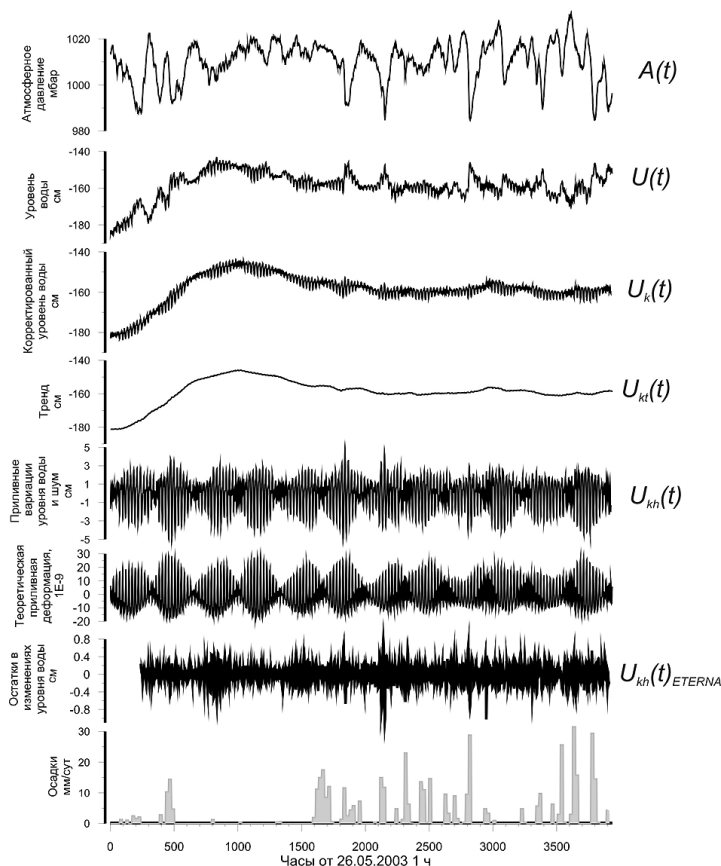


Рис. 2. Результаты обработки среднечасовых данных уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 с 26 мая по 6 ноября 2003 г. Пояснения см. текст

ляется выделение сигналов изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород из сигналов водного питания и формирования гидростатического напора в контролируемом резервуаре подземных вод, т. к. последние, как правило, имеют характер длительных переходных процессов. В зависимости от условий залегания резервуара, его изолированности слабопроницаемой толщей и гидравлической связи с грунтовыми водами, другими водоносными горизонтами и областями формирования напора и разгрузки, эффекты водного питания и формирования гидростатического напора в изменениях тренда уровня воды могут быть различными – от их практического отсутствия до очень длительных и амплитудных вариаций. Как правило, изменение давления в резервуаре контролируется сезонностью поступления инфильтрационных вод в областях питания и режимом выпадения жидких осадков. Поэтому данные о режиме выпадения атмосферных осадков, как

текущих, так и за многолетний период, являются необходимым элементом равномерных наблюдений и обработки данных. Примеры выделения относительно долговременных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды и соответствующие приемы обработки равномерных данных приводятся в [14, 30, 34].

Отклик уровня воды на выпадение осадков может запаздывать по времени, которое зависит от мощности и проницаемости перекрывающей толщи, а также от расстояния области питания резервуара подземных вод до скважины. Пополнение резервуара (его питание) инициируется после выпадения определенного порогового количества осадков. Дополнительно к запаздывающему подъему уровня, вызванному повышением давления в области питания, одновременно с выпадением осадков может появляться кратковременное повышение уровня, связанное с увеличением давления на кровлю резервуара непосредственно в районе скважины [12, 14]. Подъемы уровня воды с амплитудами 1–2 см регулярно наблюдаются в скважинах Камчатки во время выпадения обильных ( $\geq 15$ –20 мм/сут) твердых и жидких осадков.

Уровни воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 слабо реагируют на выпадение жидких осадков. Это указывает на хорошую изоляцию контролируемых резервуаров и на сравнительно большую удаленность их областей питания. Такие благоприятные условия позволяют проводить диагностику гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в течение всего времени наблюдений.

Анализ высокочастотной составляющей в изменениях уровня воды направлен на выделение интервалов времени, в течение которых наблюдается увеличение амплитуды вариаций рядов  $U_{kh}$ , фиксирующих короткопериодные изменения порового давления, не связанные с питанием резервуара или техническими причинами. Увеличение амплитуды высокочастотных вариаций уровня наблюдается при косейсмических скачках порового давления и других эффектах резкого изменения напряжено-деформированного состояния водовмещающих пород, например, при прохождении низкочастотных поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений [14, 31].

Ниже приводится описание выявленных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды на основе применения представленной методики обработки данных равномерных наблюдений.

### **Гидрогеосейсмические вариации уровня воды**

*Скважина ЮЗ-5.* По данным наблюдений в 1997–2004 гг., в изменениях уровня воды обнаружены гидрогеосейсмические вариации в связи с девятью землетрясениями (табл. 3). Эти вариации разделяются на четыре типа с учетом факторов сейсмического воздействия [14].

Таблица 3. Землетрясения, вызвавшие изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в 1997–2004 гг.

Дата, ГГММДД	Время в очаге, ЧЧ:ММ:СС	Координаты, град		Н, км	$K_s$	$M_w$	Гипоцентральное расстояние R, км	Характеристика вариаций уровня воды	
		с. ш.	в. д.					Тип вариаций уровня воды	$\Delta h$ , см
971205	11:26:51	54.64	162.55	10	15.5	7.8	320	I	-11.0
								II	-12.0
								III	≈100
980601	05:34:02	52.81	160.37	31	13.8	6.9	140	II	-1.0
990308	12:25:42	51.93	159.72	7	14.3	7.0	165	II	-1.7
001220	09:19:51	53.31	160.06	65	13.0	4.6*	130	II	0.6
030616	22:08:01	55.30	160.34	190	14.7	6.9	330	II	-0.3
030925	19:50:06	41.78	143.91	27	-	8.3	1670	IV	2.0
040320	08:53:14	53.74	160.74	31	13.1	4.9*	170	II	0.25
041226	00:58:53	3.30	95.78	30	-	9.0	8250	IV	5.0

\* – магнитуда  $M_s$

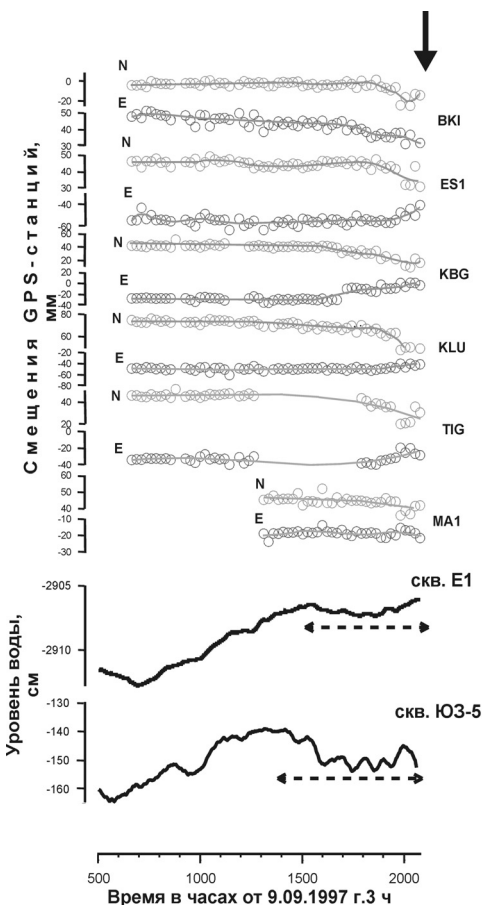
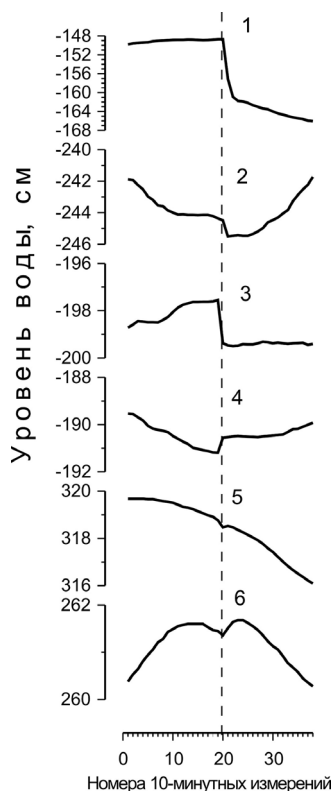


Рис. 3. Изменения уровней воды в скважинах ЮЗ-5, Е-1 и смещения GPS-станций [40] на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 05.12.97 г.,  $M = 7.8$  (показано стрелкой): VKI, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1 – GPS-станции Камчатской сети; N – смещение в направлении Ю-С, E – смещение в направлении З-В. Пунктирными стрелками показано время проявления гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды

Тип I – гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. (КЗ) (рис. 1) Перед КЗ наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды в скв. ЮЗ-5 продолжительностью около трех недель, синхронное с понижением уровня в скв. Е-1 (рис. 3). Понижение уровней в обеих скважинах примерно совпадает по времени с предсейсмическими перемещениями GPS-станций Камчатской сети, представляющими проявление деформационного предвестника этого земле-



трясения [40]. Амплитуда понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 составила 11 см, в скв. Е-1 – 1 см [14].

Тип II – косейсмические скачки уровня воды вследствие изменения статического напряженного состояния резервуара подземных вод при образовании разрывов в очагах землетрясений. При возникновении шести местных землетрясений (табл. 3) наблюдались скачки в изменении уровня воды во время 10-минутного интервала, в течение которого происходило землетрясение (рис. 4). В четырех случаях уровень понижался, в двух случаях – повышался. Амплитуды скачков  $\Delta h$  составляли 12.0–0.25 см. Направление скачков определяется характером деформации резервуара подземных вод: понижение уровня воды фиксирует деформацию расширения, повышение уровня – сжатие.

Рис. 4. Косейсмические скачки в изменении уровня воды в скважине ЮЗ-5 в моменты шести землетрясений (табл. 3)

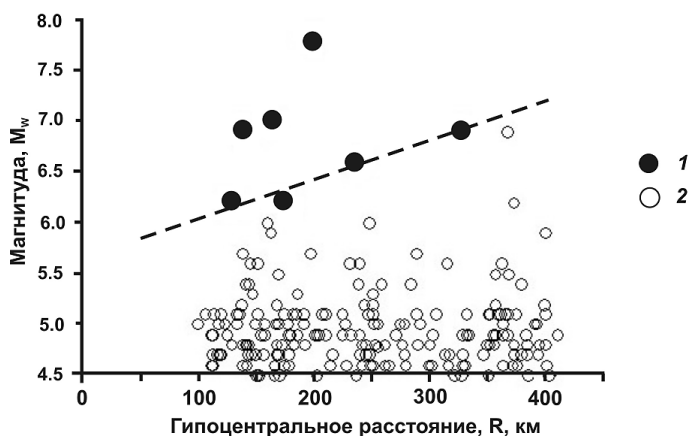


Рис. 5. Распределение землетрясений с  $M_w \geq 4.5$ , произошедших во время наблюдений на скв. ЮЗ-5 в 1997–2004 гг., в зависимости от их параметров: магнитуды  $M_w$  и гипоцентрального расстояния  $R$ , км: 1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды (табл. 3); 2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня воды не зарегистрированы. Пунктирная линия ограничивает область землетрясений с параметрами, соответствующими зависимости  $M_w \geq 0.004R + 5.6$

Параметры землетрясений, сопровождающихся косейсмическими скачками уровня, описываются зависимостью  $M_w \geq 0.004R + 5.6$  (рис. 5). В [6, 35] на примере скв. ЮЗ-5 показано, что по данным уровневых наблюдений можно получать локальную количественную оценку объемной косейсмической деформации. В случае КЗ величина объемной деформации расширения составляла  $1.55 \cdot 10^{-8}$  [35].

Тип III – длительное постсейсмическое понижение уровня воды после КЗ продолжалось в течение 3.5 мес. с амплитудой около 1 м. Затем в течение двух лет наблюдалось его возвращение к прежнему положению (рис. 6). Такой эффект в изменениях уровня воды отражает последовательное падение и восстановление порового давления в резервуаре подземных вод. В [4, 5] показано, что наиболее вероятным механизмом понижения порового давления в окрестностях скважин является локальное повышение проницаемости водовмещающих пород резервуара при сейсмических сотрясениях.

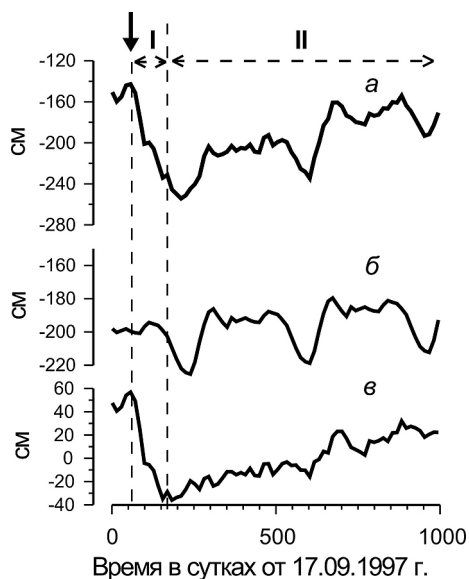


Рис. 6. Долговременные изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г.,  $M_w = 7.8$ ,  $R = 316$  км (показано стрелкой): *a* – изменения уровня воды по данным регистрации; *б* – выделенные годовая сезонность и линейный тренд; *в* – остатки в изменениях уровня воды после удаления годовой сезонности и тренда. I – фаза понижения уровня воды, II – фаза восстановления уровня воды

Тип IV – колебания уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильнейших удаленных землетрясений. На рис. 7 приводится запись вариаций уровня воды во время Суматра-Андаманского землетрясения,  $M_w = 9.0$ ,  $R = 8\ 250$  км, в сопоставлении с записью вертикальных смещений на сейсмостанции Петропавловск, расположенной в 20 км от скв. ЮЗ. Сейсмические волны регистрировались более 50-ти мин: с 1 ч 10 мин до примерно 2 ч. Амплитуда вертикального смещения достигала 2 см [20]. Вступления Р-волн (01 ч 10 мин 09 с) и S-волн (01 ч 20 мин 49 с) сопровождались колебаниями уров-

ня воды с амплитудой до 0.5 см. Вступление L-волн (01 ч 32 мин 57 с) сопровождалось изменениями уровня воды с амплитудой не менее 5 см, затем в течение примерно 9-ти часов наблюдались затухающие колебания уровня с амплитудами 0.5–0.2 см. Отношение максимальной амплитуды изменений уровня воды в скважине к максимальному смещению поверхности земли во время прохождения L-волн составляло не менее 2.5.

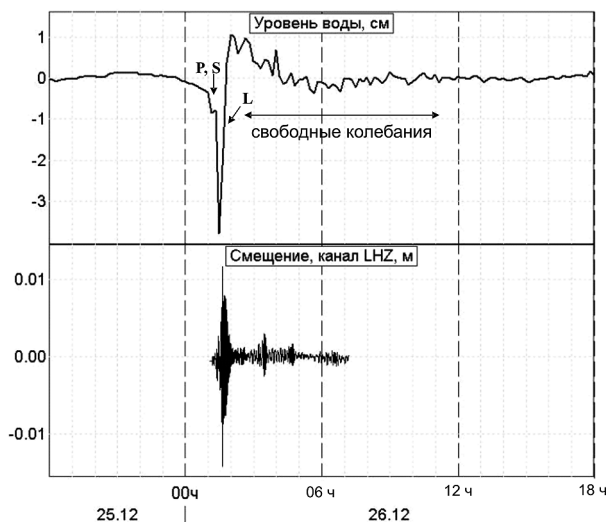


Рис. 7. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г.,  $M_w = 9.0$ ,  $R = 8\ 250$  км, в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск. Стрелками указаны вариации уровня воды во время вступления P, S и L-волн

*Скважина E-1.* По данным наблюдений в 1987-1998 гг. в изменениях тренда уровня воды выявлены постсейсмические вариации в связи с тринадцатью местными землетрясениями с  $M = 5.8-7.8$  на гипоцентральных расстояниях  $R = 100-320$  км. Постсейсмические изменения проявлялись в плавных повышениях уровня воды с амплитудами 3.7–29.8 см и продолжительностью 9–90 сут. при характерных значениях 1.5–2 мес. для землетрясений с  $M \sim 7$  (рис. 8). Перед землетрясениями наблюдалось преимущественное понижение уровня воды. При этом перед семью наиболее сильными землетрясениями понижение уровня воды происходило с повышенной скоростью, составляющей  $\leq -0.07$  см/сут. Такие понижения в [12] выделены в гидрогеодинамический предвестник сильных местных землетрясений с  $M \geq 5.5$ .

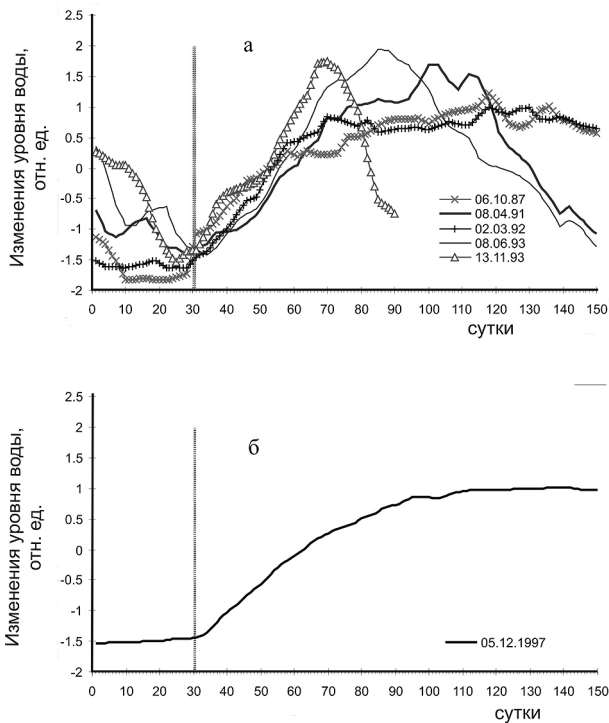


Рис. 8. Графики шести наиболее сильных постсейсмических изменений уровня воды в скв. Е-1: а – по данным наблюдений 1987-1994 гг.; б – по данным наблюдений в 1996-1998 гг. Представлены фрагменты нормированных среднесуточных временных рядов, очищенных от баровариаций, включающих 30 сут до землетрясения и 120 сут после землетрясения. Вертикальная линия показывает моменты землетрясений

же приводится зависимость, описывающая нижнюю границу области землетрясений, сопровождающихся гидрогеосейсмическими изменениями уровня воды в скв. Е-1:  $K_s = 3.39 \lg R + 6.22$  (или  $M = 2.51 \lg R + 0.6$ ).

На рис. 9 приводится диаграмма, на которой в координатах  $K_s - \lg R$  показаны землетрясения с  $K_s \geq 11.0$  в радиусе 450 км от скв. Е-1. Здесь

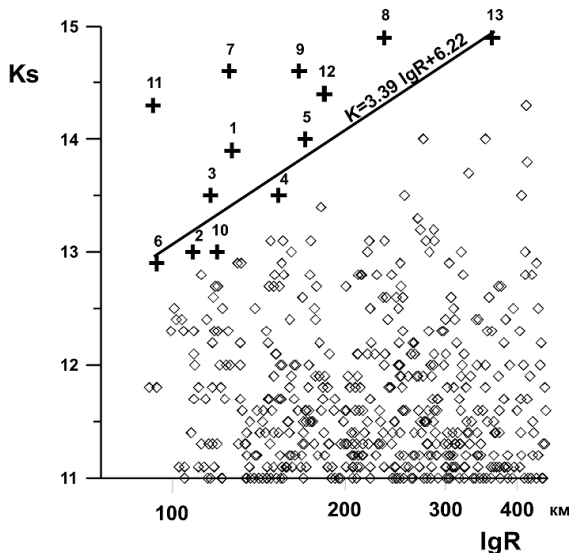


Рис. 9. Диаграмма, показывающая зависимость изменений уровня воды в скв. Е-1 от величины энергетического класса землетрясений  $K_s$  и гипоцентрального расстояния  $R$ , км. Крестиками показаны землетрясения, сопровождавшиеся пред- и постсейсмическими вариациями уровня воды (номера землетрясений по [12]). Ромбами показаны землетрясения 1987-1998 гг. с  $K_s \geq 11.0$  в радиусе до 450 км от скв. Е-1, которые не сопровождались изменениями уровня воды

*Вариации уровня воды в скважинах Камчатки в связи с Олюторским землетрясением 20.04.2006 г.,  $M_w = 7.6$ , Корякское нагорье.* Во время Олюторского землетрясения уровнемерные наблюдения проводились на шести скважинах, расположенных на расстояниях 750-1150 км от эпицентра (рис. 1). В пяти скважинах зарегистрированы постсейсмические вариации уровня воды (рис. 10). Воздействие сейсмических волн от этого землетрясения сопровождалось в основном остаточными смещениями уровня воды: понижением в наиболее близких к эпицентру скважинах 1306, 1309 и повышением в более удаленных скважинах 1303 и ЮЗ-5. Такие вариации уровня объясняются кратковременным изменением порового давления при деформации водовмещающих пород, вызванной прохождением сейсмических волн [31, 32]. Наиболее вероятным механизмом изменения порового давления является локальное изменение проницаемости водовмещающих пород и, возможно, фильтрационных связей в системе «скважина-резервуар» или в пределах контролируемых резервуаров подземных вод. Характер изменения уровня воды (его повышение или понижение) могло быть связано с различием локальных гидрогеологических условий и особенностями сейсмических сигналов в районах скважин, в частности, с их амплитудно-частотным составом. Продолжительность изменений уровня воды составляла от 2-4 сут до часов – минут. Амплитуды изменения уровня воды не превышали 10 см.

В изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е-1 выделены аномальные вариации, проявившиеся с 1 февраля по 2 марта и с 17 по 20 апреля 2006 г. в период, предшествующий Олюторскому землетрясению [34].

*Вариации уровня воды во время прохождения сейсмических волн от сильнейших удаленных землетрясений.* В скважинах Камчатки (рис. 1) зарегистрированы изменения уровня воды в связи с десятью сильнейшими ( $M \geq 7.6$ ) землетрясениями (табл. 4), произошедшими в северо-западной и западной частях Тихоокеанского сейсмического пояса на расстояниях до 8 900 км. Краткая характеристика вариаций уровня в связи с землетрясениями № 1-5 приводится выше. Описание эффектов прохождения сейсмических волн от сильнейших землетрясений 2006–2007 гг. (№ 6–10, табл. 4) приводится в [29, 31–33]. Изучение таких эффектов направлено на совершенствование теории землетрясений и их воздействия на геологическую среду, в частности, на состояние подземных вод, а также на обоснование технических требований к оборудованию, применяемому при проведении специализированных уровнемерных наблюдений.

В результате землетрясения Симуширское-1 наблюдались изменения уровня воды в скважинах 1303 (повышение на 1.6 см в течение 40 мин), ЮЗ-5 (колебания и остаточное повышение на 6.5 см в течение

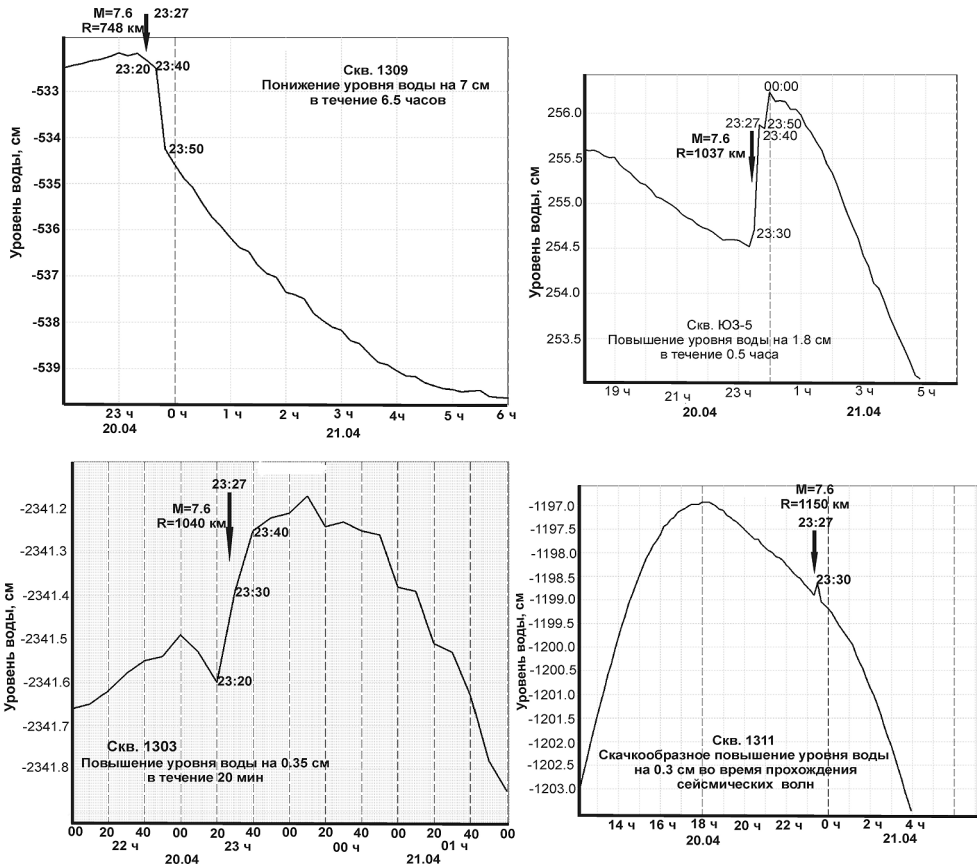


Рис. 10. Вариации уровня воды в скважинах 1309, ЮЗ-5, 1303 и 1311 в связи с Олюкторским землетрясением (по данным 10-минутной регистрации)

ние 7 ч), 1309 (колебания с амплитудой до 2.2 см в течение одного часа).

На рис. 11 представлены вариации уровня воды в пяти скважинах в связи с землетрясением Симуширское-2. В скважинах 1303, 1309, ЮЗ-5, 1311 проявлялись колебания уровня воды. В скважинах 1306 и ЮЗ-5 зарегистрированы остаточные смещения уровня. Следует отметить, что в скв. 1303 характер изменений уровня воды при двух Симуширских землетрясениях отличался: при первом землетрясении наблюдалось повышение уровня воды, во втором – проявлялся колебательный режим.

Во время прохождения сейсмических волн от землетрясения в районе Соломоновых о-вов наблюдались одиночные скачки повышения уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1309 без остаточного смещения. При двух землетрясениях 12 сентября 2007 г. в районе о-ва Суматра зарегистрированы колебания уровня в скважинах 1309 и ЮЗ-5 и остаточное понижение в скв. 1303.

Вариации уровня воды при прохождении сейсмических волн от сильнейших землетрясений в [31] разделены на два характерных типа: 1 – вынужденные и свободные колебания с остаточным смещением или без него; 2 – понижение или повышение уровня после прохождения сейсмических волн с последующим восстановлением.

Таблица 4. Данные о сильнейших землетрясениях 1997-2007 гг. ( $M \geq 7.6$ ), вызвавших изменения уровня воды в наблюдательных скважинах Камчатки

№ п/п	Название землетрясения	Дата гг.мм.дд.	Время в очаге чч:мм	Координаты, град		$M_w$	Эпицентрально-расстояние, R, км
				широта	долгота		
1	Кроноцкое	97.12.05	11:27	54.64 с. ш.	162.55 в. д.	7.8	310-320
2	Хоккайдское	03.09.25	19:50	41.78 с. ш.	143.91 в. д.	8.3	1670
3	Суматра-Андаманское	04.12.26	00:59	3.30 с. ш.	95.78 в. д.	9.0	8270
4	Суматранское-афтершок	05.03.28	16:10	2.07 с. ш.	97.01 в. д.	8.7	8290
5	Олюторское	06.04.20	23:25	61.06 с. ш.	167.58 в. д.	7.6	750-1150
6	Симуширское-1	06.11.15	11:14	46.62 с. ш.	153.22 в. д.	8.3	720-1120
7	Симуширское-2	07.01.13	4:23	46.26 с. ш.	154.45 в. д.	8.2	740-1140
8	Соломоновы о-ва	07.04.01	20:40	8.48 ю. ш.	156.98 в. д.	8.1	6810-7170
9	Суматранское	07.09.12	11:10	4.52 ю. ш.	11.37 в. д.	8.4	8620-8860
10	Суматранское	07.09.12	23:49	2.7 ю. ш.	100.7 в. д.	7.9	8500-8720

Первый тип вариаций проявлялся в скважинах 1309, ЮЗ-5 и 1303 при землетрясениях с  $M = 7.9-9.0$  на расстояниях 820-8860 км. Колебания уровня воды возникают вследствие прохождения поверхностных волн при оптимальном соотношении водопроводящих свойств водовмещающих пород и конструкции скважины. В [20, 41] такие колебания объясняются резонансным эффектом усиления вариации порового давления в системе «скважина – резервуар» при прохождении волн с периодами, соответствующими резонансной частоте скважины, которая обратно пропорциональна длине водной колонны. Резонансные частоты для камчатских скважин по [41] составляют  $0.13-0.40 \text{ с}^{-1}$  и соответствуют периодам сейсмических волн 15.7-48 с.

Смещение уровня воды после прохождения сейсмических волн (понижение или повышение) проявлялось в скважинах ЮЗ-5, 1306, 1303 и 1309 при землетрясениях с  $M = 7.6-8.3$  на расстояниях 310-990 км. Такие эффекты обусловлены вибрационным воздействием относительно высокочастотных сейсмических волн на водовмещающие породы, изменением их коллекторских свойств (пустотности и проницаемости) и влиянием последних на процесс фильтрации и перераспределение порового давления в резервуаре. Важную роль в таких явлениях может играть

временное образование фильтрационных неоднородностей при импульсном воздействии упругих сейсмических волн на водонасыщенные горные породы. Локальное изменение фильтрационных свойств водовмещающих пород может происходить при разрушении твердых перемычек в пустотном пространстве при гидравлическом ударе; при взмучивании тонкого осадка в трещинах и увеличении их пустотности; при образовании микрогидроразрывов в водовмещающих породах. В экспериментах по воздействию мощных вибрационных источников на пьезометрические скважины показано, что остаточные смещения уровня воды развиваются только при генерации упругих волн в определенных частотных диапазонах (первые десятки Гц), характерных для той или иной системы «скважина – резервуар» [2]. Этим также можно объяснить не повсеместное и незакономерное проявление остаточных смещений уровня воды в скважинах.

*О зависимости постсейсмических изменений уровня воды от амплитудно-частотного состава сейсмических волн и гидрогеологических условий.* По данным наблюдений на скв. ЮЗ-5 выделены четыре типа вариаций уровня воды при воздействии поверхностных волн от сильнейших землетрясений: 1 – вынужденные и свободные колебания уровня с кратковременным остаточным повышением при Хоккайдском, Суматра-Андаманском (рис. 7), Симуширском-1, Симуширском-2 (рис. 11) и Суматранском-1 землетрясениях; 2 – вынужденные и свободные колебания уровня воды при афтершоке Суматра-Андаманского и Суматранском-2 землетрясениях; 3 – постсейсмическое повышение уровня воды при Олюторском (рис. 10) и Сычуаньском землетрясениях; 4 – длительное постсейсмическое понижение уровня воды при Кроноцком землетрясении (рис. 6) [31].

В [38, 39] рассмотрена зависимость проявления различных типов вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 от амплитудно-частотного состава сейсмических сигналов, зарегистрированных на с/с РЕТ при землетрясениях с  $M_w = 7.6-9.0$ . При этом использовались записи 10-ти землетрясений, зарегистрированные широкополосными каналами ВН (E, N, Z) аппаратуры IRIS на с/с РЕТ.

Изучение изменения частоты сейсмического сигнала во времени выполнялось путем пропускания сигнала через набор полосовых фильтров и вычисления его огибающей в каждой полосе частот. Затем определялась максимальная амплитуда сигнала и диапазон частот ее проявления для скоростей, смещений и ускорений грунта. По полученным данным построены диаграммы, демонстрирующие соотношение амплитуд максимальных фаз колебаний грунта и частотного состава сигналов от рассматриваемых землетрясений (рис. 12) с учетом выделенных типов вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5.

По результатам сопоставления амплитудно-частотного состава движений грунта с вариациями уровня воды выделены три группы сильнейших землетрясений, сопровождавшихся различными типами откликов уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис. 12).

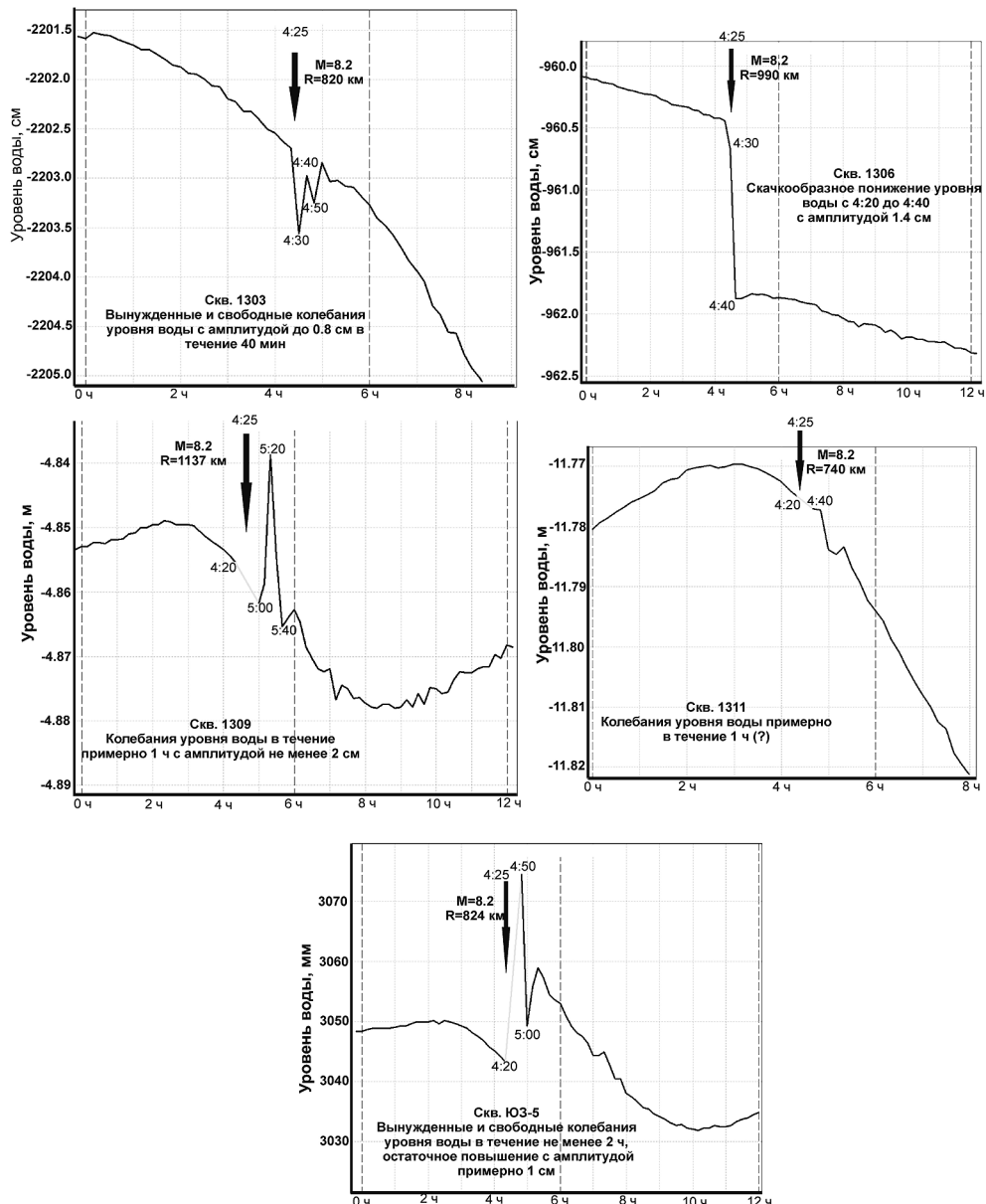


Рис. 11. Вариации уровня воды в скважинах 1303, 1306, 1309, 1311 и ЮЗ-5 в связи с землетрясением Симуширское-2 (по данным 10-минутной регистрации)

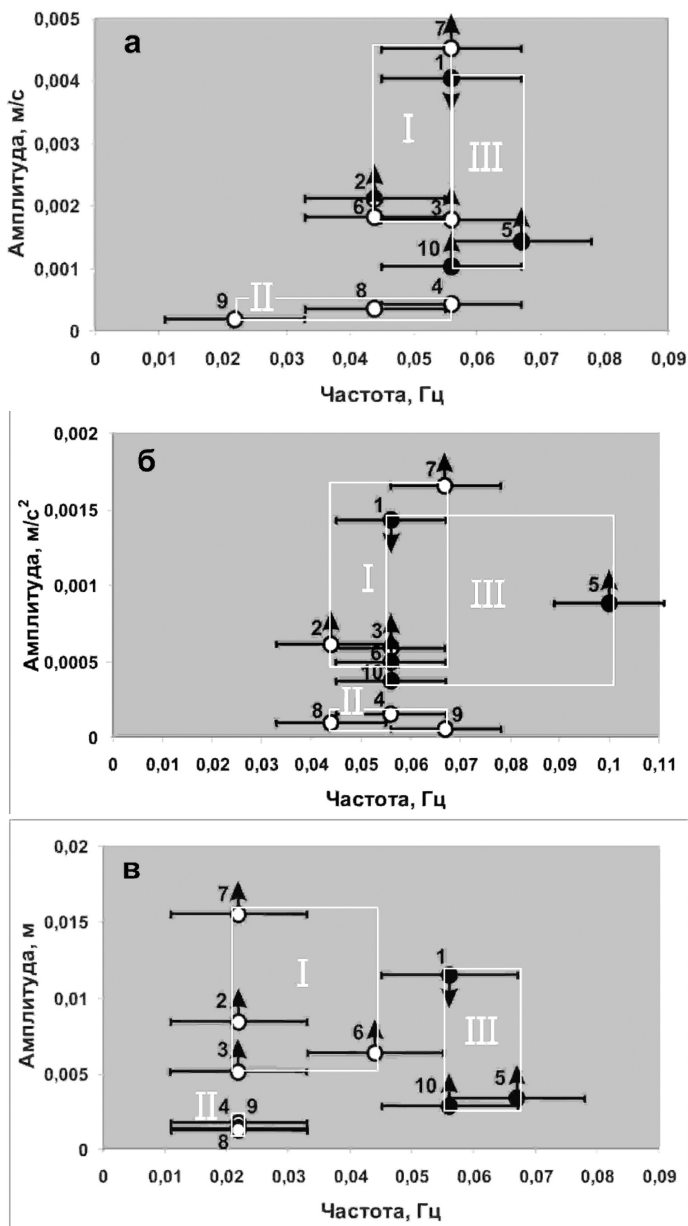


Рис. 12. Соотношение амплитуд скоростей (а), ускорений (б) и смещений (в) и частотного состава максимальных фаз колебаний грунта в районе с/с РЕТ по каналу ВНЗ; цифрами обозначены номера землетрясений (в соответствии с [38, 39]); залитыми кружками показаны остаточные повышения и понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5: стрелками показан характер изменений уровня воды (повышение – вверх, понижение – вниз); не залитыми кружками – проявление колебаний уровня воды. I, II, III – выделенные группы землетрясений (пояснения см. в тексте)

Первая группа землетрясений (I, рис. 12) с  $M_w = 7.9-9.0$ ,  $R = 800-8300$  км характеризуется колебаниями уровня воды с его остаточным повышением. Во вторую группу (II) выделены события с  $M_w = 7.9-8.6$  и  $R = 8300-8500$  км, при которых наблюдались вынужденные и свободные колебаниями уровня воды. Третью группу (III) составляют землетрясения с  $M = 7.6-7.9$  и  $R = 300-5\ 000$  км, которые сопровождались постсейсмическим повышением (понижением) уровня воды без проявления колебательного режима. Наиболее четкая зависимость проявления различных типов вариаций уровня воды от амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний грунта обнаруживается для вертикальных смещений (рис. 12в).

Приведенные данные позволяют выделить две основные тенденции, определяющие особенности вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний грунта: 1 – низкочастотные и относительно низкоамплитудные сейсмические сигналы сопровождаются колебаниями уровня воды; при увеличении амплитуды сигнала на колебательный режим могут накладываться кратковременные повышения уровня воды; 2 – относительно высокочастотные сейсмические сигналы сопровождаются повышениями уровня воды; при увеличении амплитуды сигнала могут проявляться длительные остаточные понижения уровня (например, в результате наиболее сильного Кроноцкого землетрясения, рис. 6).

Как следует из табл. 1 наблюдательные скважины различны по строению и по гидрогеологическим особенностям вскрытых резервуаров подземных вод. На рис. 13 приводятся диаграммы, показывающие особенности проявления гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в различных скважинах при сильнейших землетрясениях в зависимости от соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния  $R$ .

В изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 в связи с сильнейшими землетрясениями регистрировались затухающие колебания при прохождении поверхностных сейсмических волн и кратковременные остаточные повышения (например, после прохождения сейсмических волн от Олюторского землетрясения). При землетрясениях с  $M_w = 8.1-8.3$  на расстояниях 800–1 700 км наблюдалось наложение колебательного режима и кратковременного повышения уровня воды (рис. 13). Характерными особенностями скв. ЮЗ-5, контролирующей напорные пресные подземные воды, являются: наличие статически изолированного отклика уровня на периодах минуты – первые десятки суток [14]; большая длина открытого ствола, связывающего скважину и резервуар (490 м), средние водопродвижающие свойства резервуара ( $T = 7.8$  м<sup>2</sup>/сут).

В качестве аналогов скв. ЮЗ-5 могут рассматриваться скважины 1 309 и 1303 (рис. 1, табл. 1). Для этих скважин также установлен статичес-

ки изолированный отклик уровня воды на вариации атмосферного давления и земные приливы [25] и зарегистрированы сигналы при прохождении сейсмических волн от сильнейших удаленных землетрясений [31]. В скв. 1309 наблюдалось остаточное понижение уровня воды с амплитудой 10 см после Олюторского землетрясения и затухающие колебания уровня при землетрясениях с  $M_w = 7.9-8.4$  на расстояниях  $R = 1\ 120-8\ 860$  км. Для сигналов, зарегистрированных в скв. 1303, более характерны остаточные смещения уровня воды (повышения и понижения) без проявления колебательного режима.

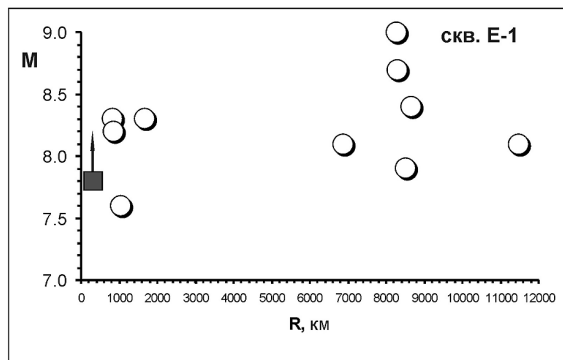
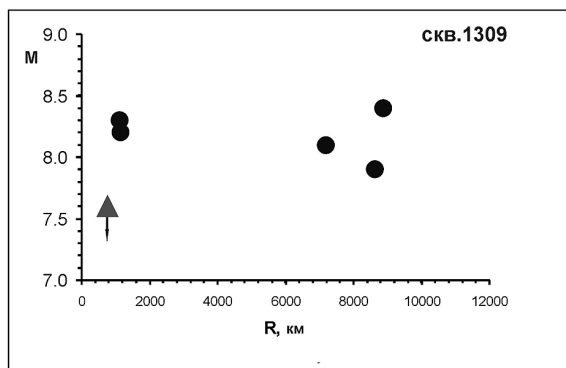
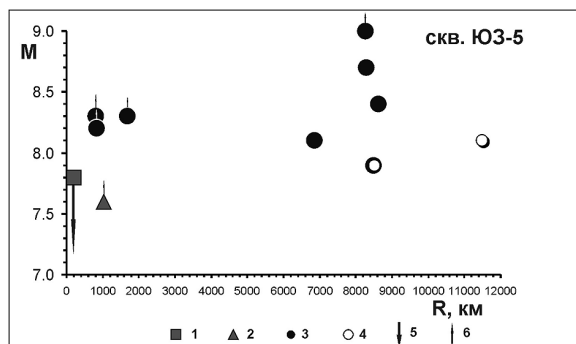


Рис. 13. Зависимость проявления различных типов вариаций уровня воды в скважинах от параметров землетрясений: 1 – Кроноцкое землетрясение (последовательное проявление гидродинамического предвестника, косейсмического скачка и длительного постсейсмического понижения и последующего восстановления уровня в скв. - ЮЗ-5; последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмического повышения уровня в скв. E-1); 2 – Олюторское землетрясение (кратковременное повышение уровня воды в скв. - ЮЗ-5 и понижение уровня в скв. 1309); 3 – колебательный режим; 4 – отсутствие вариаций уровня воды; 5 – остаточное понижение; 6 – остаточное повышение

Такие особенности в реакции уровня воды на прохождение сейсмических волн определяются, по-видимому, различием водопроводящих свойств контролируемых резервуаров подземных вод. Для резервуара, вскрытого скв. 1309, величина  $T = 75 \text{ м}^2/\text{сут}$ , для скважины 1303 –  $T = 0.32 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

В скв. Е-1, вскрывающей резервуар с двухфазным поровым флюидом (слабоминерализованная вода и газ метаново-азотного состава) и с низкими водопроводящими свойствами ( $T = 0.005 \text{ м}^2/\text{сут}$ ), прохождение поверхностных сейсмических волн от удаленных сильнейших землетрясений не сопровождалось вариациями уровня воды (рис. 13). Исключение составляет КЗ, после которого уровень плавно повышался на 30 см в течение трех месяцев (рис. 86). Такое повышение уровня показывает увеличение напора в системе «скважина – резервуар» при воздействии относительно высокочастотных сейсмических волн. В качестве наиболее вероятного механизма увеличения напора в [12] рассматривается переход растворенного газа в свободное состояние при сейсмических сотрясениях.

Если предположить, что повышение уровня воды после землетрясений происходит в основном за счет поступления пузырьков газа в водную колонну в стволе скважины и соответствующего понижения плотности флюида (при постоянстве водной массы в стволе скважины), то можно оценить изменение плотности флюида, объем и скорость поступления газа.

При высоте водной колонны в стволе скважины  $H = 635 \text{ м}$  и радиусе скважины  $r = 0.11 \text{ м}$  масса воды в стволе составляет  $m = 24\,126.2 \text{ кг}$  при плотности воды до сейсмического сотрясения  $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Объем воды  $V$  в фоновых условиях составляет  $24.13 \text{ м}^3$ . После КЗ повышение уровня составило 30 см ( $\Delta h = 30 \text{ см}$ ), и объем воды в стволе скважины увеличился до  $V_1 = 24.14 \text{ м}^3$ , т. е. на  $0.01 \text{ м}^3$  по сравнению с первоначальной величиной. Полагая, что вся величина приращения объема воды в стволе скважины обусловлена уменьшением ее плотности, можно оценить плотность воды  $\rho_1$  в экстремальной стадии постсейсмической аномалии по соотношению  $V\rho = V_1\rho_1$ ,  $\rho_1 = 999.4 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Отсюда постсейсмическое повышение уровня в скв. Е-1 на 0.3 м можно объяснить понижением плотности воды в водной колонне на 0.06 %, по сравнению с ее первоначальной плотностью.

Если предположить, что увеличение объема воды в скважине происходило исключительно за счет поступления пузырьков газа в ее ствол и пренебречь зависимостью сжимаемости газа от давления, то получается, что для объяснения постсейсмического эффекта КЗ необходимо в среднем поступление около  $100 \text{ см}^3$  газа в сутки:  $(V_1 - V)/90 \text{ сут} = 1.11 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{сут}$ , или  $111 \text{ см}^3/\text{сут}$ .

Такая гипотеза формирования постсейсмического повышения уровня воды в скв. Е-1 предполагает, что поступление свободного газа в ствол происходит относительно равномерно. Это следует из плавной формы постсейсмической аномалии (рис. 86). При этом большая часть поступившего свободного газа остается в стволе скважины. В качестве механизма задержки газовых пузырьков в стволе скважины можно предположить их «приклеивание» к металлической обсадной трубе, а также переход свободного газа в растворенное состояние и обратно. По-видимому, реальный механизм формирования постсейсмического повышения уровня воды в скв. Е-1 более сложный, по сравнению с рассмотренным, но для его прояснения необходима постановка специального эксперимента по регистрации газового состава в стволе скважины и по измерению его объема.

В неглубоких скважинах 1306 и 1311, вскрывающих подземные воды в четвертичных отложениях с высокими водопроницаемыми свойствами ( $T_{1311} = 165 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $T_{1306} = 1\,451 \text{ м}^2/\text{сут}$ ) сигналы от сильнейших удаленных землетрясений проявились весьма слабо. В случае Олюторского землетрясения зарегистрировано остаточное понижение уровня воды в скв. 1306 с амплитудой 2 см в течение двух суток. Возможно, это было связано с резким улучшением фильтрационных свойств водовмещающих пород непосредственно в районе скважины. Можно также предположить, что прохождение сейсмических волн от этого землетрясения способствовало очищению короткого дырчатого фильтра от мелкодисперсных фракций и улучшению гидравлической связи скважины и резервуара подземных вод.

Анализ вариаций уровня воды в скважинах Камчатки в связи с сильнейшими землетрясениями позволяет сделать следующие выводы.

1. В изменениях уровня воды в скважинах, вскрывающих на глубинах в первые сотни метров вулканогенно-осадочные породы неогенового возраста и терригенные породы мелового возраста, с использованием цифровой аппаратуры Кедр А2 могут регистрироваться сигналы сейсмичности различных типов: гидрогеодинамические предвестники, косейсмические скачки и постсейсмические изменения при местных землетрясениях, а также вариации уровня при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильнейших удаленных землетрясений.

2. Особенности сигналов прохождения поверхностных волн от удаленных сильнейших землетрясений в изменениях уровня воды определяются техническими характеристиками скважин и локальными гидрогеологическими условиями (состав порового флюида, водопроницающие свойства резервуара подземных вод). Колебания уровня воды

наблюдаются в скважинах, вскрывающих резервуары со средними величинами водопроницаемости  $T$  (единицы – десятки  $\text{м}^2/\text{сут}$ ) и не содержащие газ в составе порового флюида. В таких скважинах связь с резервуаром подземных вод обеспечивается через достаточно «длинную» (десятки – первые сотни м) не обсаженную часть ствола.

3. Для обеспечения детального изучения колебаний уровня воды, косейсмических скачков и возможных краткосрочных предвестников землетрясений необходимо совершенствование технических условий проведения равномерных наблюдений в скважинах, в частности, обеспечение секундных синхронных измерений уровня и атмосферного давления.

### **Оценка информативности гидрогеодинамических предвестников**

По результатам равномерных наблюдений 1987–2011 гг. гидрогеодинамический предвестник обнаружен в синхронных понижениях уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 в связи с Кроноцким землетрясением (рис. 3) [12, 15, 17]. Этот предвестник объясняется квазиупругой деформацией расширения резервуаров подземных вод при развитии преимущественно асейсмических предсейсмических движений в области очага КЗ, зафиксированных методом GPS-геодезии [21, 40].

Аномальные изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е-1 были также обнаружены в апреле 2006 г. в период, предшествующий Олюторскому землетрясению [34]. Вместе с тем, однозначное утверждение о связи (или отсутствии такой связи) выявленных аномалий с процессом подготовки Олюторского землетрясения представляется преждевременным в первую очередь из-за большой удаленности области очага этого землетрясения (1 030 км). Наиболее вероятной причиной аномальных изменений уровня воды в трех скважинах являются локальные изменения напряженно-деформированного состояния контролируемых резервуаров подземных вод вследствие активизации геодинамических процессов на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. Связь во времени между такой активизацией и подготовкой Олюторского землетрясения в Корякском нагорье может быть обусловлена планетарным процессом и требует проверки на большем фактическом материале.

В скв. Е-1 гидрогеодинамический предвестник в форме увеличения скорости понижения уровня воды регистрируется регулярно [12, 16]. На рис. 14 приводится пример такого предвестника перед землетрясением 10 марта 2007 г.,  $M_w = 6.1$ .

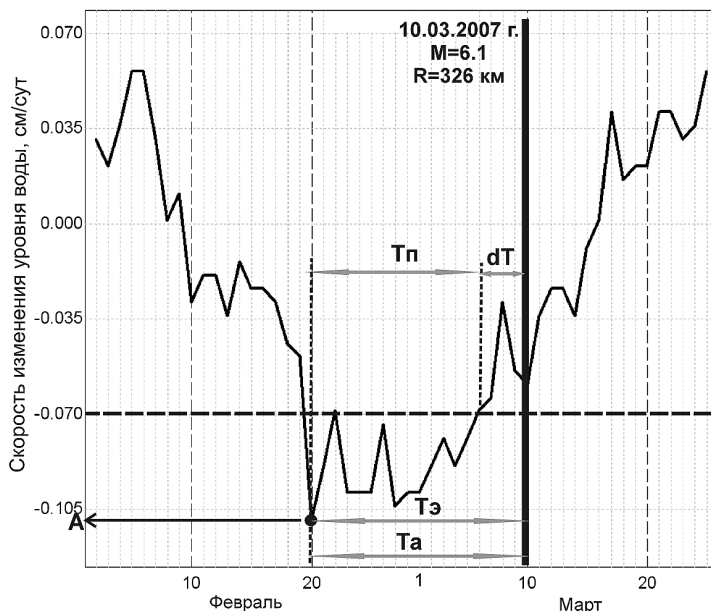


Рис. 14. Проявление гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е-1 перед землетрясением 10 марта 2007 г. и параметры предвестника:  $T_p$  – продолжительность,  $T_a$  – заблаговременность,  $A$  – экстремальная амплитуда,  $T_{\text{э}}$  – время от проявления экстремальной амплитуды до землетрясения,  $dT$  – время от окончания предвестника до землетрясения. Горизонтальной пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды  $-0.07$  см/сут

Для оценки статистической значимости предвестника его необходимо формализовать, оценить его параметры и параметры сопряженных сейсмических событий. В качестве предвестника рассматривалось понижение уровня воды со скоростью  $\leq -0.07$  см/сут в течение 5 сут и более. Если во время развития предвестника или после его окончания в течение не более 30 сут происходило землетрясение с  $M \geq 5$  на расстоянии  $R \leq 350$  км, то оно сопоставлялось с данным проявлением предвестника. Параметрами предвестника являются его продолжительность  $T_p$ , заблаговременность  $T_a$ ; экстремальная амплитуда  $A$ , равная максимальной скорости понижения уровня воды; время проявления экстремальной амплитуды до землетрясения  $T_{\text{э}}$  и время от окончания предвестника до землетрясения  $dT = T_a - T_p$  (рис. 14).

В [12] выполнена ретроспективная оценка эффективности прогностического признака – понижение уровня воды с повышенной скоростью ( $\leq -0.07$  см/сут) по методике [10] для 1987–1997 гг. Показано, что использование этого предвестника может улучшить прогнозирование зем-

летрясений с  $M \geq 5.5$  в 1.8 раза по сравнению со случайным угадыванием при вероятности возникновения землетрясений в конце прогнозируемого интервала  $P = m/n = 0.58$  (7/12), где  $n$  – общее число произошедших землетрясений,  $m$  – число землетрясений, перед которыми предвестник проявлялся. При прогнозировании землетрясений с  $M \geq 6.6$  эффективность предвестника возрастает до  $I = 2.7$  при вероятности возникновения землетрясений  $P = 0.86$  (6/7).

В [16, 17] выполнена оценка эффективности этого вида гидрогеодинамического предвестника для периода наблюдений 1996-2007 гг. В течение этого времени произошло 20 землетрясений с  $M \geq 5.0$  и  $R \leq 350$  км. Перед четырнадцатью землетрясениями проявлялся предвестник в изменениях уровня воды в скважине Е-1 (величина вероятности связи предвестника и землетрясений  $P = 14/20 = 0.70$ ). Параметры предвестника:  $T_{п} = 6-48$  сут,  $T_{а} = 6-57$  сут,  $A = -0.07-0.20$  см/сут,  $T_{э} = 2-43$  сут,  $dT = -15 - 27$  сут. Величина эффективности предвестника рассчитывалась по формуле  $I = (m/n) / (\tau/t)$ , где  $m$  – число сейсмических событий, перед которыми проявлялся предвестник;  $n$  – общее число сейсмических событий,  $\tau$  – суммарное время проявления предвестника,  $t$  – общее время наблюдений. Величина  $I$  показывает различие между отношениями  $m/n$  и  $\tau/t$ . Если эффективность  $I > 1$ , то такой предвестник является полезным для прогноза.

Эффективность гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е-1 составляет  $I = 3.2$  и показывает, что этот предвестник является полезным и может использоваться для прогноза землетрясений. С 2002 г. по настоящее время на основе этого предвестника регулярно предоставляются заключения о возможности возникновения сильных землетрясений в Камчатском регионе в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

## Заключение

1. Проведение многолетних цифровых уровнемерных наблюдений на скважинах Камчатки дало возможность диагностировать различные типы гидрогеосейсмических вариаций в изменениях уровня воды. Выполнено их описание, дана предварительная систематизация и типизация. Обнаружены индивидуальные особенности проявления гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в различных скважинах. Для некоторых скважин установлены зависимости проявления различных типов гидрогеосейсмических вариаций от параметров землетрясений.

Описание гидрогеосейсмических вариаций уровня воды с указанием их форм, амплитуд и продолжительностей составило основу для их моделирования с использованием современных математических моделей

поведения системы «скважина – резервуар» при воздействии различных факторов сейсмичности [4–8, 19–21]. С использованием результатов моделирования четырех типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 предложена феноменологическая модель поведения реальной системы «скважина – напорный резервуар пресных подземных вод» при различных механизмах сейсмического воздействия [7]. Эта модель может применяться к скважинам – аналогам для объяснения гидрогеодинамических процессов формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды.

2. В [17, 22] на примере анализа откликов уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия показана возможность проявления различных механизмов чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясений. Рассмотрены два таких механизма: 1 – реакция порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород в диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика и 2 – понижение уровня воды с повышенной скоростью, возможно, связанное с развитием дилатансии в водовмещающих породах и увеличением их емкости. Количественная оценка деформации водовмещающих пород на стадиях подготовки землетрясений возможна только для скважин с упругим механизмом чувствительности уровня воды при определении величины его деформометрической чувствительности.

3. На примере скв. ЮЗ-5 обнаружено, что при подготовке камчатских землетрясений с  $M = 5.0 - 7.0$ , удаленных на расстояние  $R \geq 100$  км, упругая деформация водовмещающих пород с амплитудами порядка  $10^{-9} - 10^{-8}$  обычно не развивается в течение часов-первых десятков суток. Особое место занимает Кроноцкое землетрясение с  $M_w = 7.8$  (гипоцентральное расстояние до скважин составляет 310 км, расстояние от центра очаговой области до скважин – 200 км), которое по равномерным данным сопровождалось развитием упругой деформации водовмещающих пород с амплитудой  $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ .

Пример многолетних наблюдений на скв. ЮЗ-5 показывает, что наличие приливных вариаций уровня воды является полезным, но недостаточным признаком информативности скважины для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Заметные гидрогеодинамические предвестники в такой скважине могут проявляться при развитии квазиупругой деформации водовмещающих пород с амплитудой порядка  $10^{-7}$  в течение не менее суток – первых недель.

4. На примере скв. Е-1 показано, что отсутствие приливных вариаций уровня не является показателем низкой информативности скважины. Обнаружено, что скв. Е-1, обладающая низкими деформометрическими свойствами и в которой отсутствуют приливные вариации уров-

ня, является информативным объектом для поиска гидрогеодинамических предвестников камчатских землетрясений. Для нее ретроспективно установлена величина эффективности использования гидрогеодинамического предвестника  $I = 3.2$  для прогноза землетрясений с  $M = 5-7$  на расстояниях до 350 км при величине вероятности связи предвестника и землетрясений  $P = 0.7$ .

## Список литературы

1. Балеста С. Т., Копылова Г. Н., Латыпов Е. Р., Кузьмин Ю. Д. Комплексные геофизические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 90–100.

2. Барабанов В. Л., Гриневский А. О., Калачев А. А., Савин И. В. Частотная характеристика системы скважина – водоносный горизонт по данным наблюдений за уровнем подземных вод // Физика Земли. 1988. № 3. С. 41–50.

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

4. 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. тр. Девятых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 23–35.

5. Болдина С. В., Копылова Г. Н. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 50–54.

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

7. 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. Всеросс. совещания по подземным водам Востока России (XIX Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. С. 425–429.

8. Болдина С. В., Копылова Г. Н. Моделирование гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Второй региональной научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 166–170.

9. Грщ Г. Н., Сугробов В. М., Хаткевич Ю. М. Некоторые результаты наблюдений за режимом подземных вод на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1983. № 4. С. 62–71.

10. Гусев А. А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
11. Ковалевский В. С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 152 с.
12. Копылова Г. Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С.39–52.
13. Копылова Г. Н. Изменения уровня воды в скважинах под влиянием землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. Вып. 5. С. 113–126.
14. Копылова Г. Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
15. Копылова Г. Н. О связи режима подземных вод с сейсмичностью и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений // Разведка и охрана недр. 2008. № 7. С. 37–45.
16. Копылова Г. Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24–28
17. Копылова Г. Н. Оценка информативности уровнемерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
18. Копылова Г. Н. Оценка деформометрических свойств системы «скважина-резервуар подземных вод» по данным уровнемерных наблюдений // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Пятые научн. чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2009. С. 252–256.
19. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина-резервуар (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Геофизический мониторинг Камчатки. Матер. научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С. 122–130.
20. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г.,  $M = 9$  // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39–48.
21. Копылова Г. Н., Болдина С. В. О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г.,  $M_w = 7.8$  // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. Докл. научн. симпоз.. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2010. С. 249–252.
22. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Уровнемерные наблюдения в скважинах при проведении мониторинга деформационных процессов в сейсмоактивных регионах // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Пятой Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 102–106.

23. Копылова Г. Н., Бормотов В. А. Эффекты сейсмичности в изменениях уровней воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер: Матер. VI междунар. междисциплин. научн. симпоз. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 134–149.

24. Копылова Г. Н., Иванов В. Ю., Касимова В. А. Разработка элементов информационной системы комплексных геофизических наблюдений на территории Камчатки // Российский журнал наук о Земле. Т. 11. RE2002,doi:10.2205/2009ES000329,2009

25. Копылова Г. Н., Куликов Г. В., Тимофеев В. М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75–83.

26. Копылова Г. Н., Латышов Е. Р., Пантюхин Е. А. Информационная система «Полигон»: комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Матер. междунар. геофиз. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 393–399.

27. Копылова Г. Н., Любушин А. А., Малугин В. А., Смирнов А. А., Таранова Л. Н. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69–79.

28. Копылова Г. Н., Любушин А. А., Смирнов А. А., Таранова Л. Н. Изменения уровня воды в скважинах Елизовская-1 и ЮЗ-5, вызванные землетрясением 5 декабря 1997 г. с  $M=7.7$  // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский, 1998. С. 148–157.

29. Копылова Г. Н., Пинегина Т. К., Смолина Н. Н. Сейсмогидрогеологические эффекты сильнейших землетрясений (на примере Камчатского региона) // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Матер. Всеросс. совещания. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. Т. 1. С. 166–172.

30. Копылова Г. Н., Сизова Е. Г. Тренды и сезонные вариации уровня воды в скважинах (в аспекте поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Второй региональной научно-технич. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 206–210.

31. Копылова Г. Н., Смолина Н. Н. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки в связи сильнейшими ( $M \geq 7.6$ ) землетрясениями // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 175–179.

32. Копылова Г. Н., Смолина Н. Н. Вариации уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г.,  $M = 7.6$  // Геофизика XXI столетия: 2007 год. Сб. тр. Девярых геофиз. чтений им. В. В. Федынского. Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 89–99.

33. Копылова Г. Н., Смолина Н. Н. Состояние и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмичности Камчатки // Сейсмич-

ность Северной Евразии. Матер. Междунар. конф. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 108–112.

34. Копылова Г. Н., Смолина Н. Н. Изменения уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г.,  $M_w = 7.6$  // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 36–49.

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

36. Любушин А. А. Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.

37. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.

38. Юшко В. А. Использование широкополосных записей сильнейших ( $M \geq 7.6$ ) землетрясений при интерпретации данных равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. третьей Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 222–226.

39. Юшко В. А. Особенности вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, при прохождении сейсмических волн от сильнейших ( $M \geq 7.6$ ) удаленных землетрясений // Матер. VI региональной молодежной научн. конф. «Исследования в области наук о Земле». Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2008. С. 112–119.

40. Gordeev E. I., Gusev A. A., Levin V. E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189–198.

41. Cooper H. H., Bredehoeft J. D., Papadopulos I.S. et al. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915–3926.

42. Roeloffs E. A. Poroelastic methods in the study of earthquake-related hydrologic phenomena // Advances in Geophysics. Academic, San Diego, Calif., 1996. P. 135–195.

43. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719–8721.