

УДК 556.33:550.348

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНОК КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНЕ

© 2010 г. Г. Н. Копылова¹, Г. М. Стеблов^{2,3}, С. В. Болдина¹, И. А. Сдельникова³

¹Камчатский филиал РАН Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³Геофизическая служба РАН, г. Обнинск

Поступила в редакцию 09.12.2008 г.

На примере шести камчатских землетрясений 1997–2004 гг. с $M_w = 6.2–7.8$, произошедших на расстояниях 128–316 км от скважины ЮЗ-5, представлен способ точечной оценки косейсмической объемной деформации по амплитудам скачков уровня воды во время землетрясений и величине приливной чувствительности уровня. Получена согласованность по амплитудам и знаку оценок косейсмической деформации из уровнемерных наблюдений и из модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве с параметрами подвижек в очагах, соответствующих фокальным механизмам из международного каталога СМТ. Непротиворечивый результат сравнения экспериментальных и теоретических оценок объемной косейсмической деформации указывает на высокие деформометрические свойства скважины ЮЗ-5 и возможность количественной оценки сейсмотектонической деформации по данным прецизионных уровнемерных наблюдений с дискретностью регистрации уровня воды не более 10 минут.

ВВЕДЕНИЕ

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из способов геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов и поиска предвестников землетрясений [Киссин, 1993]. Чувствительность уровня воды к изменениям напряженно-деформированного состояния среды определяется деформированием водовмещающих пород и вариациями порового давления при подготовке землетрясений, образовании сейсмодислокаций и распространении сейсмических волн. Эффекты воздействия землетрясений на состояние системы скважина–резервуар могут проявляться в различных типах вариаций уровня воды, соответствующих статическому изменению напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах, прохождению сейсмических волн и процессам подготовки землетрясений [Копылова, 2006].

Образование разрывов в очагах сильных землетрясений сопровождается изменением статического напряженного состояния резервуаров напорных подземных вод на расстояниях до десятков–первых сотен км. Такой эффект проявляется в косейсмических скачках повышения и понижения уровня воды в скважинах, которые регистрируются через секунды–первые десятки секунд после образования разрыва и фиксируют реакцию порового давления на упругое деформирование водовмещающих пород. Как было показано в работе [Wakita, 1975], распределение по площади зон косейсмического сжатия и

расширения и, соответственно, зон проявления скачков повышения и понижения уровня вод в скважинах, определяется, в основном, механизмом очага землетрясения. Амплитуды косейсмических скачков обычно составляют десятки долей–первые десятки см.

Необходимым условием записи косейсмических скачков является дискретность регистрации уровня воды не более 10–15 минут. При регистрации уровня с большей дискретностью (например, 1 ч) косейсмические скачки не выявляются из-за их относительно малых амплитуд и коротких длительностей развития, или их маскировки за счет наложения более длительных и амплитудных эффектов прохождения сейсмических волн, связанных, в основном, с изменением водопроницаемых свойств системы скважина–резервуар. Последнее обстоятельство, т. е. практически одновременное воздействие двух факторов сейсмичности на состояние системы скважина–резервуар: изменения статического напряженного состояния резервуара подземных вод и динамическое воздействие сейсмических волн, осложняет выделение косейсмических скачков и часто приводит к неверным выводам в отношении их амплитуд, времени проявления и, соответственно, их связи с параметрами очагов землетрясений.

Проявление косейсмических скачков, а также наличие приливных вариаций уровня воды в отдельной скважине, могут рассматриваться в качестве показателей ее деформометрической чувствительно-

сти и информативности при проведении геофизического мониторинга сейсмоактивных территорий, направленного на диагностику сеймотектонических сигналов, в т.ч. гидродинамических предвестников землетрясений [Киссин, 1993; Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989].

Фактор приливного воздействия на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры при гравитационном взаимодействии в системе Земля—Луна—Солнце достаточно хорошо изучен и рассчитывается для произвольных точек поверхности Земли с точностью не хуже 50% по отношению к данным инструментальных измерений [Мельхиор, 1968]. Некоторое несоответствие теоретических оценок и данных инструментальных измерений приливных деформаций на поверхности Земли может быть вызвано наличием локальных гравитационных неоднородностей в точках измерений, а также влиянием океанического прилива, в составе которого присутствуют волны, аналогичные земноприливным по периоду, но отличающиеся по фазе.

Количественная оценка параметров приливного отклика уровня воды в скважине: амплитуд отдельных приливных волн и разностей фаз между фазами приливных волн в изменениях уровня воды и соответствующими фазами приливного потенциала, позволяет получить величину приливной чувствительности уровня воды, которая может использоваться при оценке косейсмической деформации в районе скважины в качестве нормирующего коэффициента [Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988]. В случае проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине на изменения напряженно-деформированного состояния резервуара подземных вод, при котором течением подземных вод (фильтрацией) и инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром можно пренебречь, величина приливной чувствительности строго определяется упругими параметрами резервуара [Копылова, Болдина, 2006; Rojstaczer, Agnew, 1989]. В случае сильного искажения пороупругой реакции уровня воды на земные приливы и косейсмическую деформацию приливные вариации и косейсмические скачки в изменениях уровня воды не регистрируются (например, в скважинах, вскрывающих грунтовые воды со свободной поверхностью), и такие скважины не являются информативными для количественной оценки сеймотектонической деформации. Отсюда следует, что регистрация косейсмических скачков является важным показателем деформометрической чувствительности уровня воды в отдельных скважинах.

Скважина ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., глубина 800 м, уровень воды находится на глубине 1.5 м) (рис. 1) вскрывает в интервале 310–800 м напорные подземные воды в метаморфизованных алевроли-

тах и сланцах верхнемелового возраста. На этой скважине с сентября 1997 г. осуществляется регистрация уровня воды и атмосферного давления с дискретностью 10 минут [Копылова, 2006]. Наблюдения проводятся Камчатским филиалом Учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). В течение всего времени наблюдений точность регистрации вариаций уровня составляла ± 0.1 см, атмосферного давления — ± 0.2 гПа.

В скважине ЮЗ-5 по реакции уровня воды на вариации атмосферного давления обнаружен статически изолированный барометрический отклик воды на изменения напряженно-деформированного состояния среды в диапазоне периодов часы—первые десятки суток. Для нее также установлен неискаженный приливной отклик уровня воды на периодах приливных волн полусуточной и суточной групп [Копылова, Болдина, 2006].

В 1997–2004 гг. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 зарегистрированы шесть косейсмических скачков с амплитудами 0.25–12.0 см во время местных землетрясений с $M = 6.2$ –7.8, произошедших на расстояниях $R = 128$ –316 км до инструментальных гипоцентров (рис. 1, табл. 1). Скачки уровня регистрировались, в основном, в течение 10-минутного интервала, включающего момент землетрясения. В четырех случаях наблюдалось понижение уровня воды, в двух случаях — его повышение [Копылова, 2006]. Максимальная амплитуда косейсмического скачка понижения уровня воды ($\Delta h = -12$ см) наблюдалась во время Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (№ 1 в табл. 1 и на рис. 1). Следует отметить, что в результате этого землетрясения в изменениях уровня воды были выявлены три последовательно проявившихся типа вариаций, соответствующих гидродинамическому предвестнику, косейсмическому скачку и длительному постсейсмическому понижению и восстановлению [Копылова, 2006].

В настоящей работе проводится оценка величин объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины ЮЗ-5 при шести землетрясениях (рис. 1, табл. 1) по амплитудам косейсмических скачков с использованием расчетной величины приливной чувствительности уровня воды по отношению к теоретической объемной деформации (A_v), полученной из приливного анализа среднечасовых вариаций уровня воды. Для сравнения приводятся теоретические оценки объемной косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 при всех шести землетрясениях по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве [Okada, 1985]. Для определения параметров подвижек в очагах использованы фокальные механизмы из международного каталога Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>). По фокальным механизмам землетрясений с помощью указанной модели построены горизонталь-

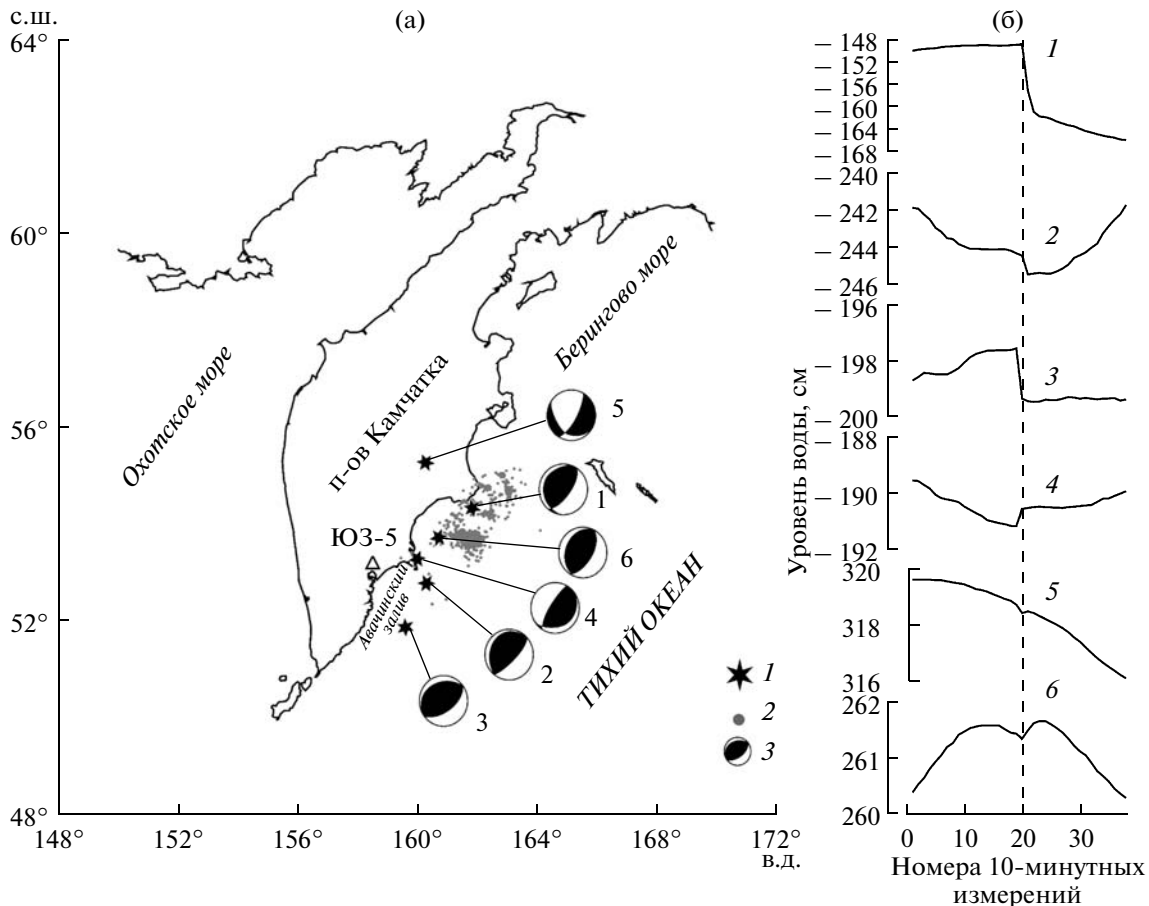


Рис. 1. Схема расположения скважины ЮЗ-5, эпицентров землетрясений 1–6 (табл. 1) и очага Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ по афтершокам первых суток: 1 – эпицентры землетрясений; 2 – эпицентры афтершоков Кроноцкого землетрясения с 5 по 12 декабря 1997 г.; 3 – диаграммы механизмов СМТ землетрясений (а); (б) – косейсмические скачки уровня, зарегистрированные во время землетрясений 1–6 (см. табл. 1). По горизонтальной шкале отложены номера 10-минутных измерений уровня, выключаящие 19 измерений до землетрясений (моменты землетрясений показаны вертикальной пунктирной линией) и 19 измерений после землетрясения.

ные распределения объемной косейсмической деформации на глубине 500 м и оценены соответствующие величины в районе скважины ЮЗ-5. Расчеты выполнены в Секторе геодинамического мониторинга Учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН.

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 2а представлен пример 10-минутных данных регистрации уровня воды и атмосферного давления в период Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. Видно, что косейсмический скачок понижения с амплитудой $\Delta h = -12$ см (1 на рис. 1б) сильно маскируется барометрическими, приливными вариациями уровня, а также развитием длительного постсейсмического понижения, последовавшего непосредственно после скачка.

На рис. 2б приводится фрагмент среднечасовых данных наблюдений, который использовался для оценки параметров приливного отклика уровня воды. В течение времени с 26.05 по 5.11.2003 г. в изменениях уровня воды проявлялись только барометрические и приливные вариации, сезонный тренд, а также слабая реакция на выпадение осадков. Косейсмические скачки или другие вариации уровня воды, вызванные землетрясениями, в течение этого периода не проявлялись.

Барометрический отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 оценивался по поведению амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня и характеризуется в диапазоне периодов от 6 ч до первых десятков суток постоянной величиной барометрической эффективности $E_b = \Delta h_a / \Delta p_a = 0.39$ см/гПа, где Δh_a – амплитуда барометрических вариаций уровня воды, см; Δp_a – амплитуда изменения атмосферного давления, гПа [Копылова, 2006]. Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давле-

Таблица 1. Данные о землетрясениях и косейсмических скачках уровня воды в скважине ЮЗ-5, параметры подвижек в очагах и оценка косейсмической деформации

№ п/п	Дата гг.мм.дд.	Время в очаге чч.мм	Координаты, град		Глубина, км	M_w	Гипоцентральное расстояние, R , км	Амплитуда скачка уровня воды, Δh , см	Параметры очага, градусы			Объемная косейсмическая деформация в районе скважины ЮЗ-5, 10^{-9}	
			с.ш.	в.д.					азимут про- стирания плоскости разрыва	угол паде- ния плос- кости раз- рыва	направ- ление подвиж- ки	по косей- смическим скачкам уровня, D_1	по модели дислокаци- онного ис- точника, D_2
1	97.12.05	11:27	54.0	162.3	25	7.8	316, 200*	-12.0	202	23	74	75 ± 4	15.5
2	98.06.01	05:34	52.81	160.37	31	6.9	140	-1.0	210	22	78	6.3 ± 0.7	-2.4
3	99.03.08	12:26	51.93	159.72	7	7.0	164	-1.7	242	28	101	10.6 ± 0.8	43.2
4	00.12.20	09:20	53.31	160.06	65	6.2	128	0.6	220	69	77	-3.8 ± 0.5	-0.4
5	03.03.16	22:08	55.30	160.34	190	6.9	328	-0.3	123	32	-161	1.9 ± 0.4	0.9
6	04.03.20	08:53	53.74	160.76	31	6.2	169	0.25	216	34	90	-1.6 ± 0.4	-0.5

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

Таблица 2. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]

Волна, период, ч	Амплитуда объемной деформации D_t , ед. $\times 10^{-9}$	Амплитуда уровня воды H_t , см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/ 10^{-9}	Фазовый сдвиг, град
Q_1 26.87	1.40	0.276	36	0.197 ± 0.005	-166 ± 2
O_1 25.82	7.31	1.338	174	0.183 ± 0.001	-166 ± 0.3
M_1 24.83	0.57	0.102	13	0.178 ± 0.013	-168 ± 4
P_1S_1 23.93	10.28	1.161	151	0.113 ± 0.001	-170 ± 0.4
J_1 23.10	0.57	0.094	12	0.163 ± 0.013	-179 ± 4
OO_1 22.31	0.31	0.053	7	0.169 ± 0.024	-174 ± 8
$2N_2$ 12.87	0.21	0.045	13	0.216 ± 0.017	-177 ± 4
N_2 12.66	1.30	0.220	64	0.170 ± 0.003	-177 ± 1
M_2 12.42	6.78	0.940	272	0.138 ± 0.001	-172 ± 0.2
L_2 12.19	0.19	0.028	8	0.147 ± 0.018	-168 ± 7
S_2K_2 12.00	3.16	0.457	132	0.145 ± 0.001	-154 ± 0.4
M_3 8.28	0.03	0.008	3	0.273 ± 0.086	-138 ± 18

Примечание. Жирным выделены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум ≥ 10 .

ния в этом диапазоне периодов близка к -180° . Это указывает на хорошую изоляцию резервуара подземных вод перекрывающими породами и отсутствие искажения реакции уровня воды на изменения порового давления при упругой деформации водовмещающих пород. В этом диапазоне периодов для скважины ЮЗ-5 принимается гипотеза о статически изолированном отклике уровня на изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород [Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989]. На меньших периодах (2–6 ч) наблюдается возрастание величины E_b от 0.2 до 0.39 см/гПа, которое, в основном, обусловлено инерционностью во-

дообмена между скважиной и насыщенными водовмещающими породами [Копылова, Болдина, 2006].

Оценка параметров приливного отклика уровня воды (амплитуд приливных волн, амплитудных факторов, равных отношению выделенных амплитуд отдельных волн в изменениях уровня воды к соответствующим величинам теоретической объемной деформации; разности фаз между фазами приливных волн в изменениях уровня и соответствующими фазами приливного потенциала) проводилась с использованием программы ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]. Результаты анализа представлены в табл. 2.

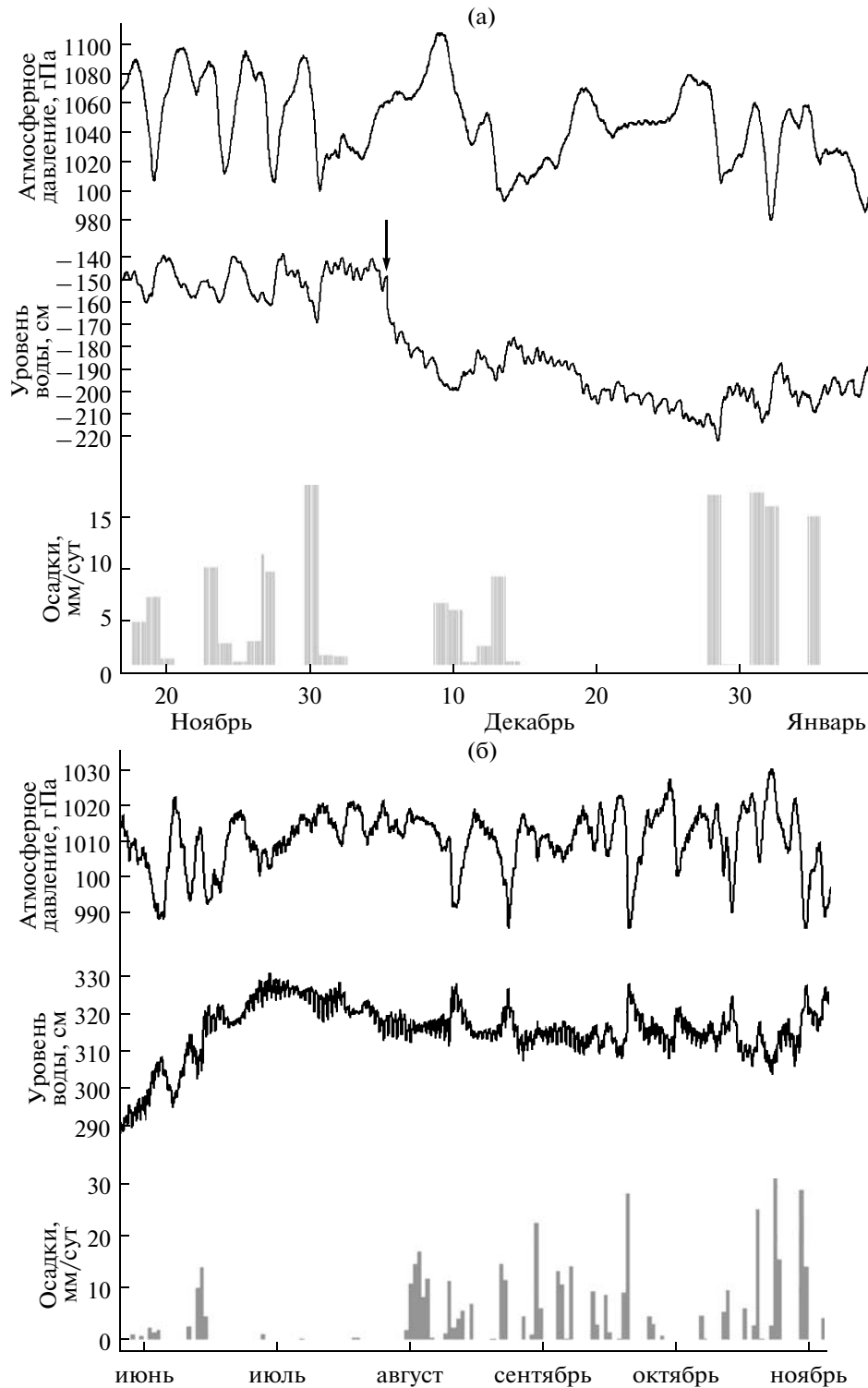


Рис. 2. Данные наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления на скважине ЮЗ-5 в сопоставлении с суточными суммами осадков: (а) — данные 10-минутной регистрации с 17.11.1997 г. по 08.01.1998 г. во время Кроноцкого землетрясения (показано черной стрелкой); (б) — среднечасовые данные наблюдений за атмосферным давлением и уровнем воды 26.05–05.11.2003 г.

Для 8-ми волн суточной и полусуточной групп ($Q_1, O_1, M_1, J_1, 2N_2, N_2, M_2, S_2K_2$) приливные параметры достаточно надежно определяются по уров-

немерным данным при отношении сигнал/шум ≥ 10 (12–272). Величины приливных параметров по наиболее мощной волне P_1S_1 не учитывались из-за

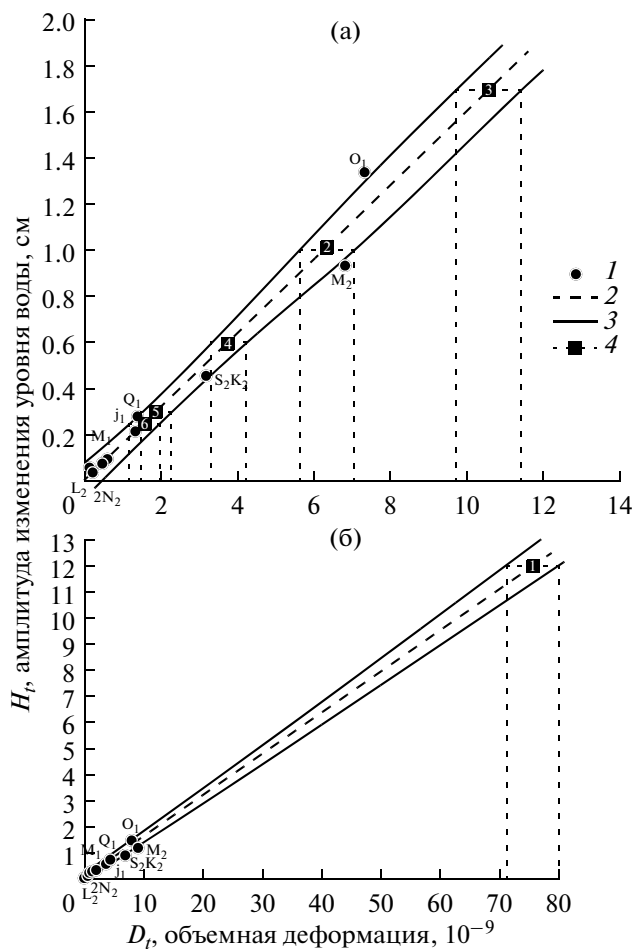


Рис. 3. Зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды H_t от теоретических величин приливной объемной деформации D_t (табл. 2): 1 – приливные волны; 2 – тренд линейной зависимости амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды от соответствующих величин приливной объемной деформации при значении коэффициента корреляции $K = 0.98$; 3 – 95% доверительный интервал для линейной зависимости выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин теоретической приливной деформации; 4 – амплитуды косейсмических скачков во время землетрясений (номера соответствуют номерам землетрясений по табл. 1) и диапазоны оценок косейсмической деформации (а); (б) – оценка косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении (№ 1 в табл. 1) с учетом линейной связи H_t и D_t .

зашумленности вариаций уровня воды действием метеофакторов на суточном периоде. Величины амплитудных факторов для выделенных 8-ми волн находятся в диапазоне $0.138\text{--}0.216\text{ см}/10^{-9}$. Различия в величинах амплитудных факторов для отдельных волн могут быть вызваны особенностями формирования приливного отклика в различных частотных диапазонах, а также некоторым искажением приливных амплитуд в изменениях уровня воды при воздействии океанического прилива, в котором

присутствуют волны, имеющие такие же периоды, но отличающиеся по фазе [Копылова, Болдина, 2006]. На некоторое влияние океанического прилива, в частности, указывают значения разности фаз между приливными вариациями уровня воды и соответствующими компонентами теоретического земного прилива, составляющие $-154^\circ\text{--}179^\circ$, и отличающиеся в среднем от “идеального” значения (-180°) на 10° .

На рис. 3а приводится линейная зависимость выделенных амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды H_t , см от теоретических амплитуд объемной деформации D_t , 10^{-9} по модели приливного потенциала CTED [Wenzel, 1994]. Наблюдается тесная линейная связь между этими величинами, которая с оценкой 95%-го доверительного интервала имеет вид:

$$H_t = (0.161 \pm 0.008)D_t + (0.004 \pm 0.068). \quad (1)$$

Наклон линейной зависимости, связывающей выделенные амплитуды приливных изменений уровня и соответствующие величины объемной деформации $\Delta H_t/\Delta D_t = A_v$, составляет $\approx 0.161\text{ см}/10^{-9}$. Эта величина представляется наиболее приемлемой в качестве характеристики приливной чувствительности уровня воды A_v для скважины ЮЗ-5 во всем диапазоне приливных периодов.

Из предположения [Копылова, Болдина, 2006; Rojstaczer, 1988] о линейном характере связи между вариациями уровня воды и объемной деформацией водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков ($10^{-9}\text{--}10^{-7}$) можно оценивать сейсмотектоническую деформацию по амплитудам изменения уровня воды в диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика по формуле:

$$D = -\Delta h/A_v, \quad (2)$$

где D – объемная деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию; Δh – амплитуда изменения уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует понижению уровня воды; A_v – приливная чувствительность уровня воды в $\text{см}/10^{-9}$.

Точность регистрации вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 составляет 0.1 см, поэтому при величине $A_v = 0.161\text{ см}/10^{-9}$ можно ожидать заметные изменения уровня воды при объемной деформации вскрытого резервуара подземных вод с амплитудами не менее первых единиц $\times 10^{-9}$.

Оценка косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 с учетом 95%-ого доверительного интервала зависимости (1) приводится на рис. 3а для пяти землетрясений (№ 2–6, табл. 1). На рис. 3б представлена соответствующая оценка для Кроноцкого землетрясения (№ 1, табл. 1).

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО МОДЕЛИ ДИСЛОКАЦИИ

Для всех шести землетрясений (табл. 1) также была оценена объемная косейсмическая деформация в окрестности скважины ЮЗ-5 по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве. В расчетах использована программа, разработанная Y. Okada на основе аналитических выражений смещений и напряжений в таком полупространстве вследствие однородной подвижки по заглубленному разрыву прямоугольной формы. Для получения соответствующих формул в [Okada, 1985] функция отклика среды на точечную дислокацию проинтегрирована в явном виде по площади разрыва. Исходными данными для программы являются: геометрия разрыва (размеры, ориентация, глубина), величина и направление подвижки по разрыву, отношение упругих модулей среды. В результате расчетов получается трехмерное поле деформаций полупространства в виде распределения вектора смещения и его пространственных частных производных.

Для определения параметров подвижек в очагах использованы данные международного каталога СМТ: азимут простирания и угол падения плоскости разрыва, направление подвижки по разрыву, скалярный сейсмический момент. Кроме того, из каталога NEIC (http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html) брались моментные магнитуды землетрясений M_w для событий 1–3 и 5. Моментные магнитуды событий 4 и 5, для которых в каталоге NEIC приводятся только магнитуды m_b , оценивались из зависимости между m_b и M_w по [Гусев, Мельникова, 1990].

Размеры очага: длина L по простиранию и ширина W по падению, оценивались из магнитуды M по формулам [Ризниченко, 1976]:

$$\lg L = 0.440M - 1.289, \quad (3)$$

$$\lg W = 0.401M - 1.448. \quad (4)$$

Величина подвижки по разрыву U определялась из скалярного сейсмического момента M_0 :

$$U = M_0 / S\mu, \quad (5)$$

где $S = LW$ – площадь разрыва, μ – модуль сдвига упругой среды.

Координаты и глубины источников для событий 2–6 задавались по данным Камчатского регионального каталога землетрясений, составленного КФ ГС РАН (http://data.emsd.iks.ru/dbquaketxt_min/index_r.htm#tops). Мы полагаем, что определение гипоцентров камчатских землетрясений по данным достаточно плотной Камчатской региональной сети сейсмических станций является более надежным, по сравнению с их определениями в международных каталогах землетрясений. Например, различия в определениях гипоцентров землетрясений 2–6, табл. 1, по Камчатскому региональному каталогу и по каталогу СМТ достигают первых десятков км. Для наиболее круп-

ного из всех рассматриваемых землетрясений – Кроноцкого (№ 1, табл. 1), положение и площадь разрыва уточнялась по облаку афтершоков первых суток также по определениям региональной сети [Левина, Гусев и др., 2003].

Относительное изменение объема D_2 оценивалось как сумма диагональных компонент тензора деформации, которая, в свою очередь, представляется в виде дивергенции вектора смещения \mathbf{u} :

$$D_2 = \operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (6)$$

где пространственные частные производные вектора \mathbf{u} вычислены с помощью указанной выше программы Y. Okada. Вследствие незначительности вариаций $\operatorname{div} \mathbf{u}$ в объеме, вмещающем скважину (не более 1%), в качестве коэффициента относительного объемного расширения принималось значение $\operatorname{div} \mathbf{u}$ на средней глубине скважины 500 м. Получившиеся горизонтальные распределения объемной косейсмической деформации на этой глубине при землетрясениях 1–6 (табл. 1) представлены на рис. 4. Сравнение указанных на рис. 4 величин деформации в районе скважины ЮЗ-5 с данными уровнемерных наблюдений приведено в табл. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение величин D_1 и D_2 и возможные ошибки их определения. Для пяти землетрясений из шести по обоим методам получено соответствие оценок косейсмической деформации по знаку и по амплитуде в пределах одного порядка величин (табл. 1). Исключение составляет землетрясение 01.06.1998 г., для которого оценки косейсмической деформации имеют противоположный знак: расширение по данным уровнемерных наблюдений и сжатие по модели дислокации. В случае этого землетрясения скважина попадает в зону резких латеральных вариаций деформации с переходом от расширения к сжатию. Подобные зоны на рис. 4 характеризуются сгущением изолиний. Незначительное изменение входных данных (положение и ориентация разрыва) приводит к значительным изменениям в результирующей оценке D_2 , вплоть до смены знака. Так при небольшом отклонении угла падения для очага землетрясения 01.06.1998 г. (27° вместо 22° по СМТ) получается вполне приемлемое согласование величины и знака деформации (расширение): $D_1 = 6.3 \times 10^{-9}$ по косейсмическому скачку уровня воды и $D_2 = 7.3 \times 10^{-9}$ по модели дислокационного источника. Погрешность определения угла падения в СМТ составляет особенно заметную относительную величину при небольших значениях самого угла, что характерно для межплитовых субдукционных землетрясений вблизи желоба.

Существенно влияет на точность и ряд упрощений, заложенных в самой модели равномерной подвижки по разрыву в однородном полупростран-

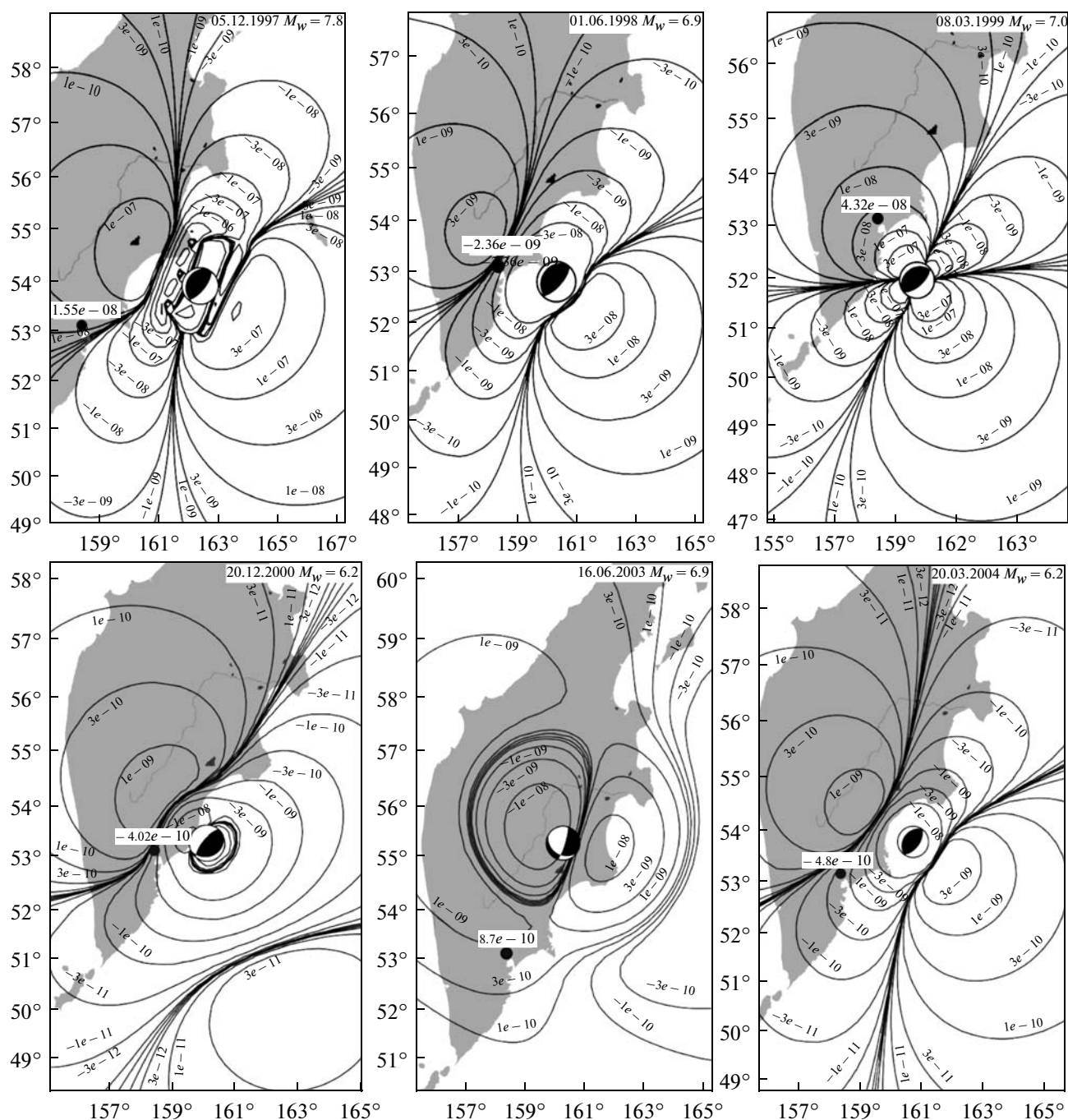


Рис. 4. Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника для землетрясений 1–6 (табл. 1) с указанием величин деформации в районе скважины ЮЗ-5 (показана черным кружком).

стве. На больших расстояниях от очага заметно проявление сферичности и слоистости, а вблизи крупных сейсмических событий со значительной протяженностью очаговой зоны (например, при Кроноцком землетрясении № 1, табл. 1, рис. 1) может сказываться неравномерность подвижки.

Некоторая неточность также содержится и в определении объемной косейсмической деформации

по данным равномерных наблюдений D_1 , в первую очередь, при оценивании величины приливной чувствительности уровня воды A_v . Как указывалось выше, величины амплитудных факторов по отдельным волнам рассчитывались по отношению к теоретическим величинам объемной приливной деформации, которые могут отличаться до 50% по отношению к реальным величинам вследствие

неоднородности строения среды и искажения океаническим приливом. Для уточнения величины A_v представляется целесообразным проведение синхронных равномерных и деформометрических наблюдений.

На рис. 5 приводится соотношение величин D_1 и D_2 . Наблюдается равномерное распределение точек относительно средней линии, характеризующей прямую зависимость D_1 и D_2 . Какое-либо закономерное смещение точек друг относительно друга не наблюдается, что указывает на отсутствие систематической ошибки в определении косейсмической деформации по обоим методам. Поэтому можно полагать, что имеющиеся расхождения в оценках D_1 и D_2 обусловлены ошибками оценивания объемных деформаций, присущих обоим методам.

О зависимости проявления косейсмических скачков уровня воды от параметров землетрясений. На рис. 6 в координатах M_w —гипоцентральное расстояние R приводится распределение камчатских землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине ЮЗ-5. Особенностью района исследований является то, что сильные землетрясения в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны происходят, в основном, на гипоцентральных расстояниях 100 км и более от скважины ЮЗ-5. При этом землетрясения, сопровождающиеся косейсмическими скачками уровня воды, являются наиболее сильными и близкими к скважине. Параметры таких землетрясений, в первом приближении, описываются уравнением $M_w \geq 0.004R + 5.6$ (линия, ограничивающая область землетрясений, сопровождающихся косейсмическими скачками уровня воды на рис. 6). И именно для таких землетрясений может оцениваться косейсмическая деформация по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5. Амплитуды косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 при землетрясениях, расположенных ниже линии на рис. 6, по видимому, составляет менее единиц $\times 10^{-9}$, т.е. ниже деформометрической чувствительности вариаций уровня воды.

Особенности проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 при изменениях атмосферного давления и при косейсмической деформации. По результатам кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления, приведенного в работе [Копылова, Болдина, 2006; Копылова, 2006], предполагается наличие статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменение напряженно-деформированного состояния вскрытого резервуара в диапазоне периодов от 6 ч до первых десятков суток. Статически изолированный отклик уровня воды характеризуется упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород, которая определяется, в основном, упругими параметрами контролируемого резервуара и не

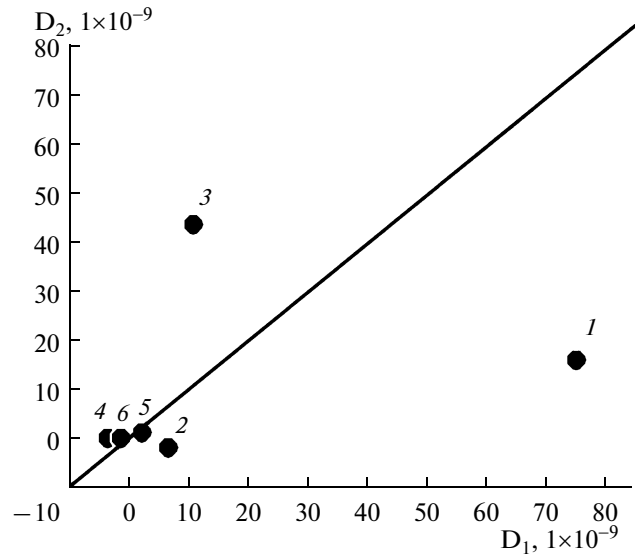


Рис. 5. Соотношение величин косейсмической объемной деформации, полученных по данным равномерных наблюдений D_1 и по модели дислокационного источника D_2 . Номера соответствуют номерам землетрясений по табл. 1.

искажается течением воды. Поэтому в работе [Копылова, Болдина, 2006] предполагалось, что скважина ЮЗ-5 будет работать как деформограф без существенных искажений в диапазоне периодов часы—первые десятки суток. На больших периодах отклик уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара подземных вод может искажаться за счет процессов фильтрации и сезонного изменения гидростатического на-

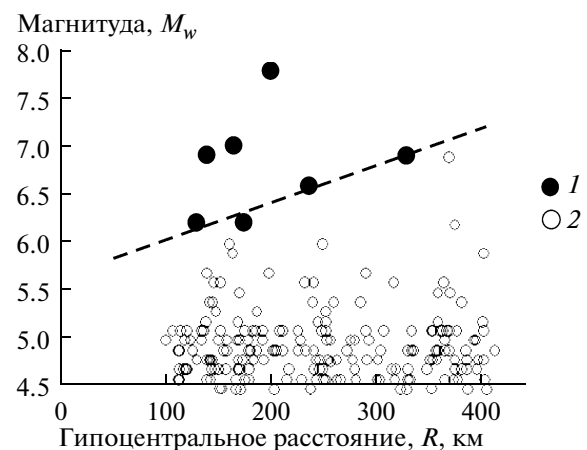


Рис. 6. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших во время наблюдений на скважине ЮЗ-5 в 1997–2004 гг., в зависимости от их параметров: магнитуды M_w и гипоцентрального расстояния R , км: 1 — землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды (табл. 1); 2 — землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня воды не зарегистрированы.

пора. На меньших периодах отклик уровня воды на периодические изменения порового давления может ослабляться вследствие инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод [Болдина, Копылова, 2006].

Примерное соответствие оценок косейсмической деформации по уровнемерным данным и по модели дислокационного источника показывает, во-первых, что амплитуды косейсмических скачков уровня воды адекватно отражают косейсмическую деформацию водовмещающих пород и, во-вторых, они практически не искажаются инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод. Это позволяет, в случае проявления косейсмических скачков, расширить диапазон проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 в область малых периодов, составляющих минуты.

При этом следует учитывать различие между механизмами воздействия переменной барометрической нагрузки и косейсмической деформации на изменения уровня воды. При воздействии атмосферного давления происходят квазипериодическое изменение вертикальной нагрузки на контролируемый скважиной резервуар подземных вод и соответствующие вариации порового давления в нем. При этом, с уменьшением периода, амплитуды вариаций атмосферного давления и изменений порового давления монотонно уменьшаются. На малых периодах, составляющих минуты—первые часы, отклик порового давления на атмосферную нагрузку является относительно слабым, и соответствующая реакция уровня воды в скважине, вследствие ненулевой массы воды в стволе, подавляется инерционным процессом водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод [Болдина, Копылова, 2006]. В скважине ЮЗ-5 максимальная и постоянная величина амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды наблюдается лишь на периодах ≥ 6 ч.

При образовании разрыва в очаге сильного землетрясения перераспределение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород происходит быстро и включает весь их объем. При этом изменение порового давления в резервуаре подземных вод (его уменьшение при расширении и рост при сжатии) мгновенно достигает максимального значения. В таком случае реакция уровня воды в скважине на импульс порового давления практически не искажается инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод, т. к. в это время весь контролируемый скважиной объем взаимосвязанных водовмещающих пород “работает” на максимальную отдачу или поглощение воды. Для этого в скважине ЮЗ-5 имеются благоприятные условия — длинный (490 м) открытый ствол, связывающий скважину и резервуар подземных вод, и большая поверхность связи ствола и водовмещающих пород (258.6 м²).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе представлен новый способ точечной оценки величин объемной косейсмической деформации при образовании разрывов в очагах сильных ($M_w \geq 6$) камчатских землетрясений по данным скважинных уровнемерных наблюдений. Предложенный способ оценки косейсмической деформации основывается на результатах комплексного анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине и на данных по амплитудам косейсмических скачков, определяемых при интервале дискретизации данных регистрации уровня воды 10 мин.

Анализ барометрической реакции уровня воды позволяет определить наличие и оценить частотный диапазон проявления неискаженного статически изолированного *барометрического* отклика уровня воды на изменения напряженно-деформированного состояния контролируемого резервуара подземных вод. На основе анализа приливных вариаций уровня воды оценивается величина приливной чувствительности уровня воды, которая используется в качестве нормирующего коэффициента для оценки косейсмической деформации по амплитудам зарегистрированных косейсмических скачков уровня воды при образовании разрывов в очагах землетрясений.

На примере 6-ти землетрясений показано, что полученные оценки косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений на камчатской скважине ЮЗ-5, в большинстве случаев, согласуются по знаку и по амплитуде с теоретическими оценками по модели протяженного источника дислокации. Некоторое различие в величинах косейсмических объемных деформаций, полученных по обоим методам, определяются ошибками их определения, присущих обоим методам.

2. Регистрация косейсмических скачков уровня воды в скважине ЮЗ-5 при местных сильных землетрясениях является показателем статически изолированных условий в системе скважина—резервуар на минутных периодах при образовании сейсмических разрывов и импульсном изменении напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород. Благоприятными факторами для проявления такого отклика в скважине ЮЗ-5 являются наличие длинной открытой части ствола скважины и большой поверхности связи ствола и водовмещающих пород. Параметры камчатских землетрясений (соотношение магнитуды и гипоцентрального расстояния), которые могут сопровождаться в районе скважины ЮЗ-5 косейсмической деформацией с амплитудами порядка единиц $\times 10^{-9}$ и более, описываются уравнением $M_w \geq 0.004R + 5.6$.

Полученное соответствие теоретических оценок косейсмической деформации и экспериментальных оценок по данным уровнемерных наблюдений подтверждает деформометрическую чувствитель-

ность уровня воды в скважине ЮЗ-5 и перспективность ее использования в системе геофизического мониторинга Камчатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Киссин И.Г.* Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58–69.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
- Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др.* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка). Землетрясения в Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН. 2003. С. 251–271.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Roeloffs E.A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
- Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 13619–13634.
- Rojstaczer S., Agnew D.S.* The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403–12411.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
- Wakita H.* Water level as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. № 189. P. 553–555.
- Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BИМ. 1994. № 118. P. 8719–8721.