

УДК 556.33:550.348

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНОК КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНЕ

© 2010 г. Г. Н. Копылова<sup>1</sup>, Г. М. Стеблов<sup>2,3</sup>, С. В. Болдина<sup>1</sup>, И. А. Сдельникова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал РАН Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Геофизическая 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.

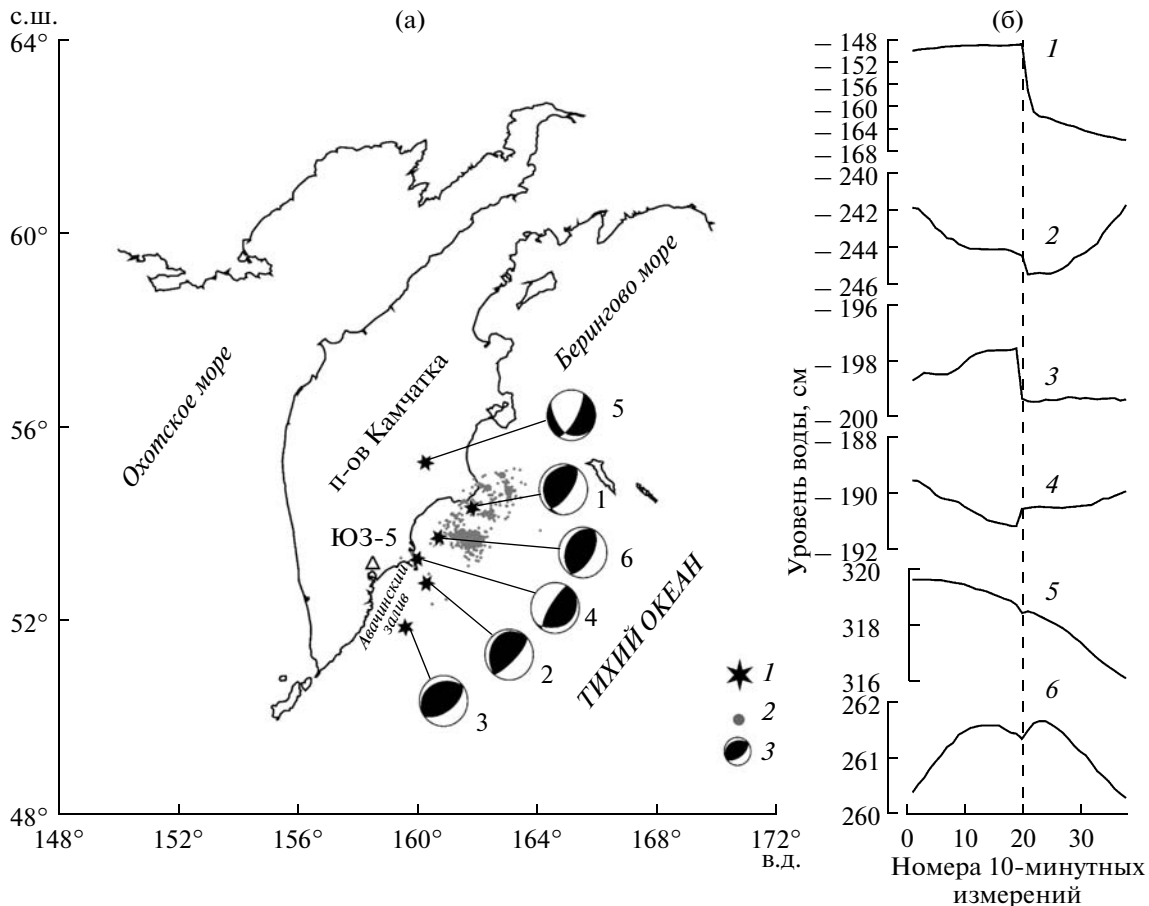
Скважина ЮЗ-5 ( $53.17^\circ$  с. ш.,  $158.41^\circ$  в. д., глубина 800 м, уровень воды находится на глубине 1.5 м) (рис. 1) вскрывает в интервале 310–800 м напорные подземные воды в метаморфизованных алевроли-

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  $\pm 0.1$  см, атмосферного давления —  $\pm 0.2$  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  $\Delta h_a$  – амплитуда барометрических вариаций уровня воды, см;  $\Delta p_a$  – 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, $\Delta h$ , 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	$75 \pm 4$	15.5
2	98.06.01	05:34	52.81	160.37	31	6.9	140	-1.0	210	22	78	$6.3 \pm 0.7$	-2.4
3	99.03.08	12:26	51.93	159.72	7	7.0	164	-1.7	242	28	101	$10.6 \pm 0.8$	43.2
4	00.12.20	09:20	53.31	160.06	65	6.2	128	0.6	220	69	77	$-3.8 \pm 0.5$	-0.4
5	03.03.16	22:08	55.30	160.34	190	6.9	328	-0.3	123	32	-161	$1.9 \pm 0.4$	0.9
6	04.03.20	08:53	53.74	160.76	31	6.2	169	0.25	216	34	90	$-1.6 \pm 0.4$	-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]

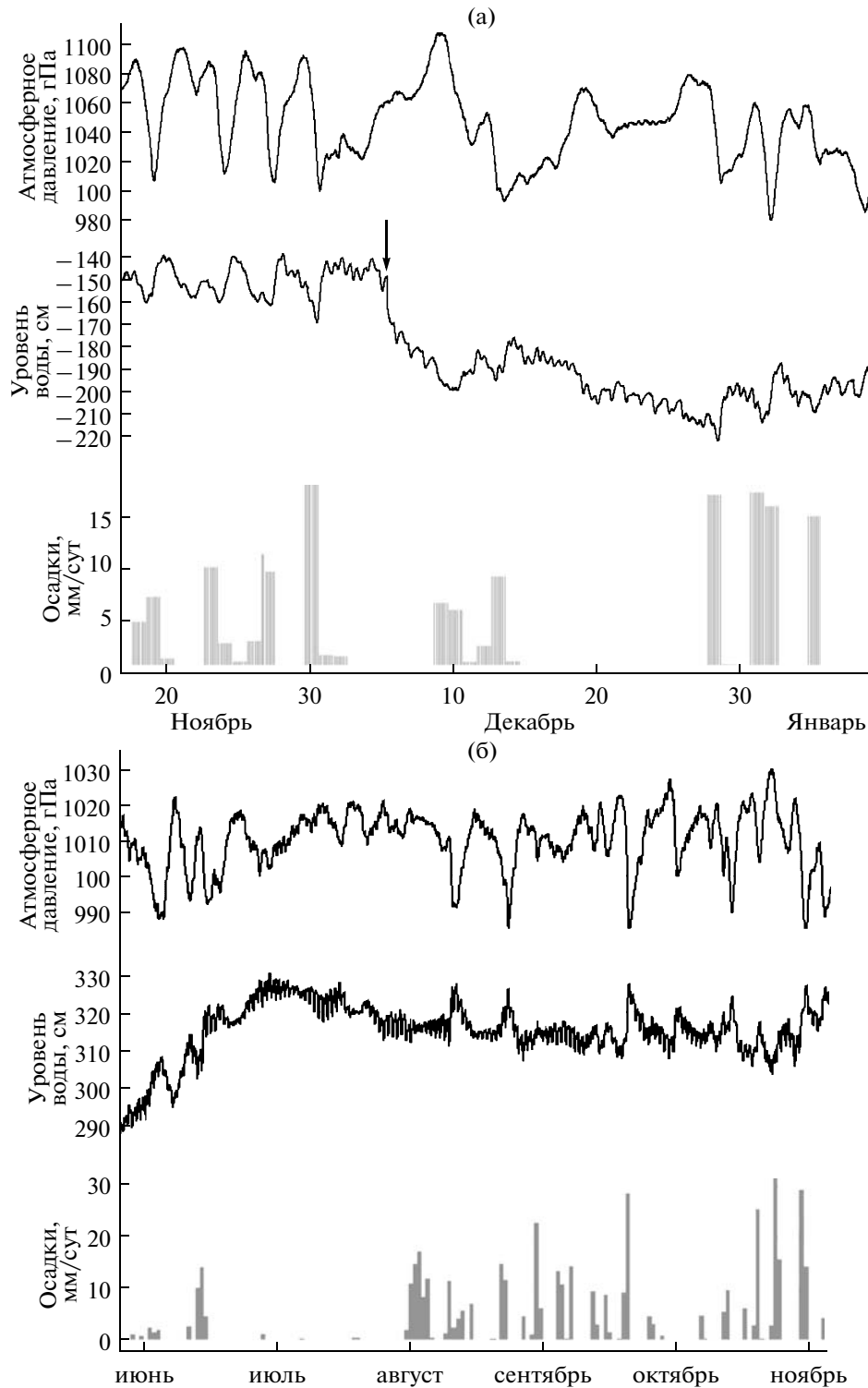
Волна, период, ч	Амплитуда объемной деформации $D_t$ , ед. $\times 10^{-9}$	Амплитуда уровня воды $H_t$ , см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/ $10^{-9}$	Фазовый сдвиг, град
<b><math>Q_1</math> 26.87</b>	<b>1.40</b>	<b>0.276</b>	<b>36</b>	<b><math>0.197 \pm 0.005</math></b>	<b><math>-166 \pm 2</math>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

Примечание. Жирным выделены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум  $\geq 10$ .

ния в этом диапазоне периодов близка к  $-180^\circ$ . 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].

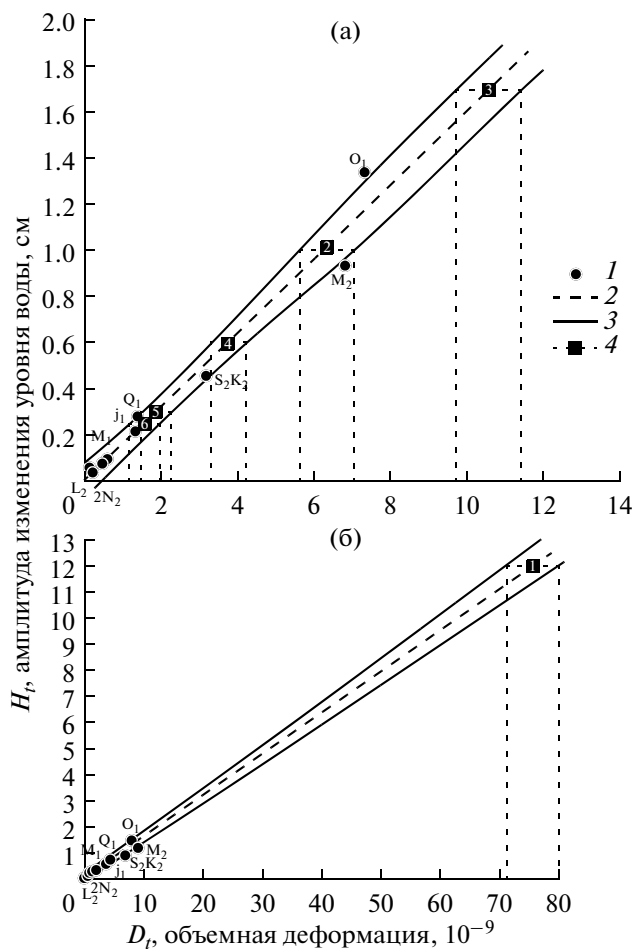
Оценка параметров приливного отклика уровня воды (амплитуд приливных волн, амплитудных факторов, равных отношению выделенных амплитуд отдельных волн в изменениях уровня воды к соответствующим величинам теоретической объемной деформации; разности фаз между фазами приливных волн в изменениях уровня и соответствующими 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  $\geq 10$  (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 ( $-180^\circ$ ) на  $10^\circ$ .

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;  $\Delta h$  – 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](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,  $\mu$  – 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](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  $\mathbf{u}$ :

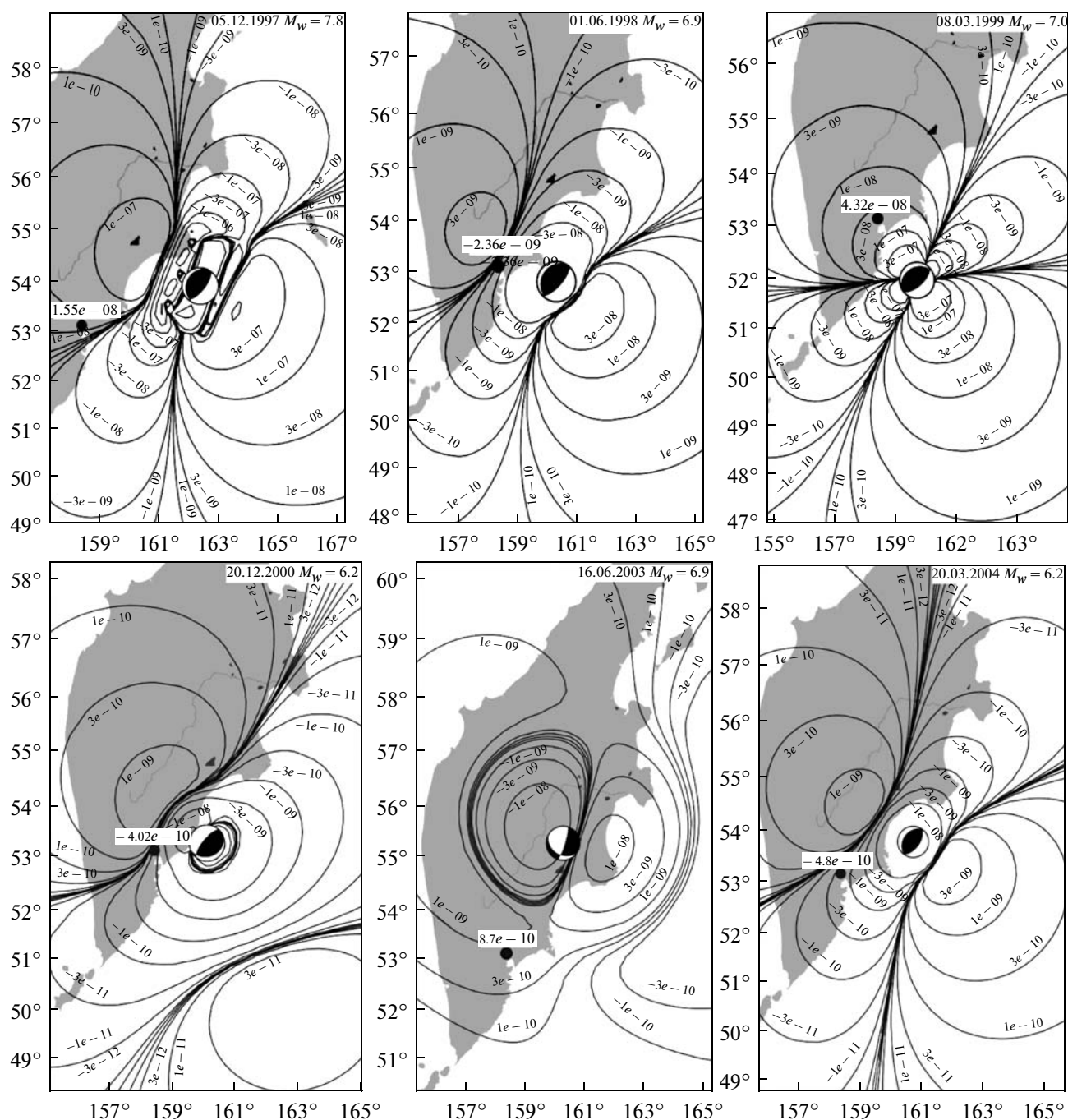
$$D_2 = \operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (6)$$

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. ( $27^\circ$  вместо  $22^\circ$  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

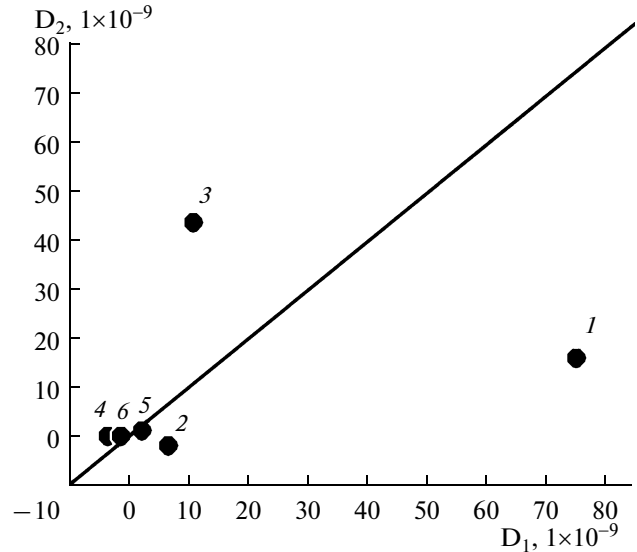


Рис. 5. Соотношение величин косейсмической объемной деформации, полученных по данным равномерных наблюдений  $D_1$  и по модели дислокационного источника  $D_2$ . Номера соответствуют номерам землетрясений по табл. 1.

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-

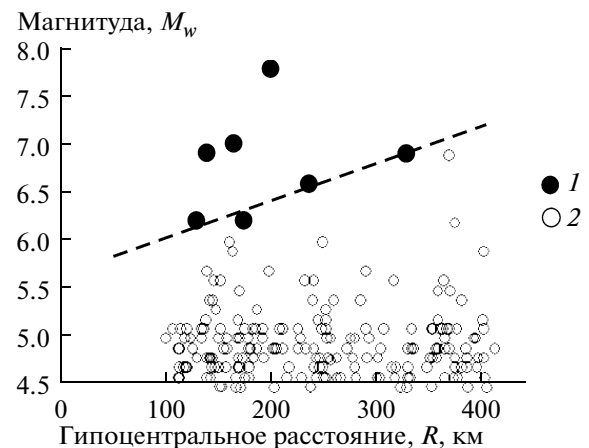


Рис. 6. Распределение землетрясений с  $M_w \geq 4.5$ , произошедших во время наблюдений на скважине ЮЗ-5 в 1997–2004 гг., в зависимости от их параметров: магнитуды  $M_w$  и гипоцентрального расстояния  $R$ , км: 1 — землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды (табл. 1); 2 —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

## 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.