

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ФЛЮИДОВ ВСЛЕДСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ЧАСТЬ 1. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М.

Выполнен анализ данных наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах при воздействии сейсмических колебаний от удаленных землетрясений. Показано, что в большинстве случаев величина постсейсмического изменения уровня пропорциональна корню квадратному из максимального значения скорости смещения грунта. При этом в зависимости от конкретных гидрогеологических условий интенсивность остаточных изменений уровня меняется в пределах 1÷5см/микро-стрейн динамической деформации, хотя наблюдаются и значительные отклонения от этого диапазона как в ту, так и в другую сторону.

Введение

В настоящее время можно считать достоверно установленным факт отклика подземных коллекторов флюидов на воздействия удаленных землетрясений, а в ряде случаев и на низкоамплитудные вибрации от искусственных источников. Систематические наблюдения продемонстрировали значимые изменения уровня воды в скважинах, скорости водопритока и даже проницаемости коллекторов как реакцию на косейсмические и постсейсмические деформации [Brodsky et al., 2003; Manga and Brodsky, 2006; Elkhoury et al., 2006 и др.].

Подобные изменения уровня, очевидно, соответствуют быстрому перераспределению порового давления флюида, что в свою очередь может привести к изменению свойств грунта, инициировать динамические события или вызвать обширные деформации в земной коре.

При землетрясениях неоднократно регистрировалось резкое изменение дебитов скважин на нефтяных месторождениях [Осика, 1981]. В ряде публикаций сообщается и об изменении различных характеристик месторождения углеводородов в результате техногенного вибрационного воздействия на пласт, например [Дыбленко и др. 2000].

На больших расстояниях статические напряжения, вызванные смещениями в очаге, слишком малы для того, чтобы стать причиной значимых изменений уровня флюида в скважине, а конкретный механизм изменения флюидодинамического режима в результате воздействия слабых сейсмических колебаний пока неясен. В некоторых моделях изменение порового давления связывается с интенсивной дегазацией флюида под действием вибрации [Linde et al., 1994; Roeloffs, 1998 и др.], хотя в большинстве случаев количество газовой фазы слишком мало для достижения наблюдаемых эффектов. Более перспективной представляется гипотеза, предложенная в работе [Brodsky et al., 2003], в которой эффект увеличения проницаемости связывается с декольматацией трещин в результате разрушения пробок, препятствующих течению флюида по трещине.

В данной работе мы проанализировали результаты натурных наблюдений в скважинах, расположенных в разных геологических условиях, и попытались выявить параметры воздействия, которые определяют наблюдаемые эффекты.

Оценка параметров динамического воздействия от удаленных землетрясений

С развитием цифровых методов регистрации стали появляться данные непрерывного контроля уровня воды в скважинах. Эти измерения, проводимые с высокой частотой опроса, демонстрируют, что отклик пласта на воздействие сейсмических колебаний состоит из двух частей. Во-первых, это динамическое изменение уровня, обусловленное осцилляцией порового давления при прохождении сейсмической волны. Эта часть отклика обычно коррелирована с формой и амплитудой низкочастотных поверхностных волн и наблюдается практически всегда. Вторая часть отклика – остаточное изменение свойств пласта, выражающееся, чаще всего, в изменении уровня жидкости в скважине – менее стабильна. В некоторых случаях остаточные проявления формируются в течение нескольких минут, т.е. фактически сразу после прохождения цуга поверхностных волн. В других случаях свойства пласта изменяются постепенно в течение нескольких суток [Brodsky E. и др. 2003].

В ближней зоне землетрясения, на расстояниях сопоставимых с размером очага, остаточные изменения уровня воды в скважинах обычно связываются с квазистатическим изменением напряженно-деформированного состояния среды, вызванным сейсмодислокацией [Manga and Brodsky, 2006]. Особенности гидрогеологических эффектов в ближней зоне чаще всего неплохо соответствуют закономерностям расположения зон положительных и отрицательных вариаций уровня кулоновских напряжений [Grecksch et al., 1999].

На расстояниях свыше нескольких размеров очага амплитуда квазистатического изменения напряжений уменьшается пропорционально кубу расстояния и может быть оценена по простому соотношению [Kanamori H., Brodsky E, 2004]:

$$\Delta\sigma_s = \frac{M_0}{4\pi R^3} \quad (1)$$

где R – расстояние от очага землетрясения, а M_0 – сейсмический момент.

Понятно, что прохождение сейсмических волн также вызывает вариацию напряженного состояния коллектора, причем из-за более медленного, по сравнению со статическим решением, затухания с расстоянием, амплитуда этих возмущений на больших расстояниях существенно превышает изменения статического поля. Подробное исследование закономерностей изменения амплитуды сейсмических колебаний с расстоянием, проведенное в недавней работе [Gomberg et al., 2006] показывает, что значения максимальной скорости смещения грунта от землетрясений различной магнитуды достаточно неплохо коррелируют с расстоянием, нормированным на характерный размер источника.

На рис.1. значками приведены результаты измерений максимальной массовой скорости грунта в зависимости от расстояния R , нормированного на характерную длину источника D при различных событиях. При этом величина D рассчитывалась по соотношению:

$$\lg D (\text{м}) = \begin{cases} 0,39M + 1,33, & 2 < M < 4 \\ 0,66M + 0,17, & 4 \leq M \end{cases} \quad (2)$$

полученному в [Кочарян, 2009] для усредненных величин длин разрывов событий с различными фокальными механизмами.

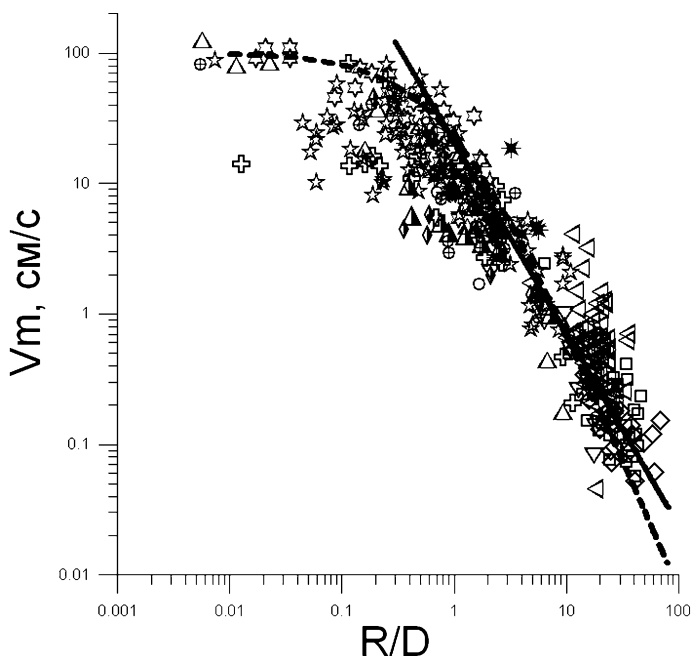


Рис. 1. Изменения максимальной скорости смещения грунта с расстоянием от эпицентра землетрясения.

Расстояние R нормировано на характерную длину источника D . Значки – различные землетрясения с магнитудой M_w от 4,4 до 7,9 [Gomberg et al., 2006]. Пунктир – зависимость (3), сплошная линия – (4)

Пунктиром приведена предложенная в [Gomberg et al., 2006] зависимость:

$$V_m(R) = \frac{81}{(0.9 + R/D)^2}, \quad (3)$$

а сплошной линией соотношение

$$V_m(R) = \frac{21}{(R/D)^{1.5}}, \quad (4)$$

которое описывает экспериментальные данные в диапазоне расстояния $(R/D) > 3$ с коэффициентом корреляции $R = 0,75$.

Из (2) и (4) имеем для событий с $M > 4$:

$$V_m = \frac{0.0012}{R^{1.5}} 10^M, \quad (5)$$

которое мы в дальнейшем будем использовать при проведении оценок.

В последнем выражении V_m выражается в см/с, а расстояние в км.

Полагая, что динамическое напряжение связано обычным соотношением с плотностью ρ , скоростью распространения поперечных волн C_s и максимальной скоростью смещения грунта V_m :

$$\sigma_d = \rho \cdot C_s \cdot V_m \quad (6)$$

можно оценить соотношение на больших расстояниях между вариацией статических напряжений (1) и динамическими напряжениями (6).

Легко убедиться, что на расстояниях выше одного-двух размеров источника, динамические напряжения значительно превышают вариации статического поля. С помощью соотношения (1) и обычного соотношения между магнитудой и сейсмическим моментом легко оценить эпицентральное расстояние, на котором амплитуда квазистатических изменения поля напряжений становится меньше характерной величины приливных напряжений $\sigma_{\text{пр}} = 10^{-3}$ МПа:

$$\lg R_t = \frac{1}{2} M + 5/3 \quad (7)$$

В дальнейшем, для определенности, мы будем полагать, что на расстояниях выше, чем R_t именно динамическое воздействие сейсмических волн вызывает значимые изменения порового давления в коллекторе.

Некоторые результаты наблюдений

Колебания уровня, связанные с прохождением сейсмических волн, регистрируются практически повсеместно и, в частности, в скважине, расположенной на Геофизической Обсерватории ИДГ РАН в Михнево. Станция расположена на юге Московской области, вне зоны активного техногенного воздействия. Скважина диаметром 118 мм вскрыла напорный алексинско-тарусский водоносный горизонт нижнего карбона, приуроченный к неравномерно трещиноватым известнякам. Скважина обсажена до глубины 91 м. Ниже ствол скважины открыт. По расходомерии и телеметрии открытой части ствола скважины выделены основные интервалы водопритоков на глубинах 92–94 м и 99–100 м. Измеренная величина пластового давления составляет около 80 КПа, а коэффициент фильтрации – 0,1–0,15 м/сут.

С февраля 2008 г. проводятся регулярные прецизионные наблюдения за уровнем подземных вод с использованием датчика LMP308i (Германия) синхронно с измерениями атмосферного давления (датчик абсолютного давления, ИКИ, Россия). Интервал опроса параметров составляет 1 с, точность регистрации уровня – 0,1 мм, атмосферного давления – 0,1 гПа. На станции, в непосредственной близости от скважины, ведутся сейсмические наблюдения. Регистрация производится различными датчиками в широком диапазоне частот.

На рис. 2 приведены записи вариаций уровня воды в скважине на ГФО «Михнево» и сейсмограммы, зарегистрированные широкополосным датчиком STS-2 27.02.2010 г. Можно видеть, что на записи уровня отчетливо выделяются вступления различных групп волн, а максимальная амплитуда колебаний уровня наблюдается в группе поверхностных волн и составляет величину около 7 мм при характерном периоде около 30 с. Можно видеть, что в группе поверхностных волн, после краткого переходного процесса, колебания жидкости в скважине «отслеживают» вертикальную составляющую колебаний грунта. При этом амплитуда смещения грунта примерно вдвое меньше амплитуды смещения уровня воды в скважине.

В колебаниях уровня прослеживается влияние и более слабых землетрясений, которое можно обнаружить после очистки записи от шумов, барометрических и

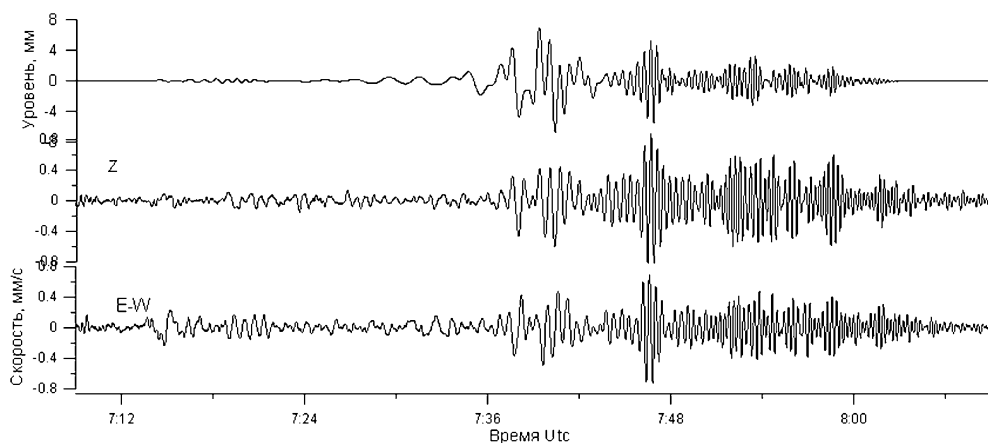


Рис. 2. Записи вариаций уровня воды (верхняя панель) и параметров сейсмических колебаний при Чилийском землетрясении $M = 8,8$ 27.02.2010 г.

приливных деформаций, а также низкочастотного тренда. Подчеркнем, что амплитуда колебаний уровня для таких событий находится вне области надежной регистрации датчика, поэтому можно сделать заключение, что уровень воды в скважине не реагирует на слабое воздействие, однако сделать обоснованное заключение о количественных характеристиках вариаций уровня нельзя.

Немногочисленные данные, полученные на ГФО «Михнево», не позволяют достоверно судить о зависимости амплитуды динамических колебаний h_d уровня воды в скважине от параметров сейсмических колебаний грунта. Судя по данным, опубликованным, например, в [Liu et al., 2006], зависимость h_d от максимальной скорости смещения грунта u_{max} близка к линейной. Для оценки амплитуды вариаций уровня в скважине глубиной 63 м при локальных землетрясениях [Liu et al., 2006] получена эмпирическая зависимость

$$\ln h = 0,97 \ln u - 2,27 \quad (8)$$

При воздействии существенно более низкочастотных телесеизмических колебаний аналогичная зависимость для той же скважины:

$$\ln h = 1,01 \ln u + 2,04 \quad (9)$$

Сравнение (8) и (9) демонстрирует, что реакция на низкочастотное воздействие почти на два порядка более интенсивная, что в целом согласуется с представлениями о влиянии инерционности перетока на характер движения столба жидкости [Brodsky et al., 2003].

Существенно более многообразен постдинамический отклик скважины на сейсмическое воздействие, который наблюдается в скважинах различной глубины, пробуренных в разных геологических условиях. Мы использовали для анализа опубликованные данные по тем скважинам, для которых имеются сведения о реакции на несколько удаленных сейсмических событий. Сведения о наблюдательных скважинах представлены в таблице 1.

Таблица 1

№	Сведения о скважине	Наблюдения	Параметры регрессии			Параметры регрессии (10)		Источник
			α	β	$dh = \alpha \cdot u_m^\beta$	r^2	r^3	
а	Скважина BV, Калифорния Глубина 30 м. Аллювий. Пласт напорный	1987–1995 гг. 8 зарегистрированных косейсмических и постсейсмических повышений уровня	0,50	23,1	0,71	29,3	0,75	Roeloffs, 1998
б	Скважина ЮЗ, Камчатка Глубина 800 м, открытый интервал 310–800 м. Зоны водопритоков общей мощностью 100 м	1997–2003 гг. 8 зарегистрированных косейсмических и постсейсмических вариаций уровня	0,38	5,10	0,53	4,79	0,46	Копылова Г.Н., Болдина С.В. 2006
в	Скважина Е-1, Камчатка Глубина 665 м, перфорация в интервале 625–647 м; туфы	1987–1998 11 зарегистрированных косейсмических и постсейсмических повышений уровня	0,39	1,21	0,44	1,92	0,47	Копылова Г.Н. 2000
г	Скважина Dzahai, Китай, в песчаннике глубиной 112 м	11 зарегистрированных постсейсмических повышений уровня	0,48	7,96	0,30	8,83	0,42	Yang и др., 2005
д	Скважина SN-3, Япония Глубина 130 м, перфорация 119–130 м, выветрелый гранит, расположена вблизи разлома	1989–1998 Косейсмические изменения зафиксированы для 21 из 45 крупных удаленных и средних региональных землетрясений.	0,01	12,05				King С.-Y. и др. 1999
е	Скважина Naibata, Япония Песчаник с пропластками аргиллита. Глубина 170 м, перфорированная область – 71–154 м	1981–1997 28 зарегистрированных косейсмических и постсейсмических понижений уровня	0,47	2,64	0,51	2,97	0,71	Matsumoto N., Kitagawa G., Roeloffs E. A. 2003
ж	Группа скважин SR-1, SP-1, OB, YN Скважины глубиной свыше 1000 м в коренных породах	1993–1994 Косейсмические и постсейсмические вариации уровня при 4-х землетрясениях	0,98 1,23 1,17	2,27 0,41 0,9	0,95 0,8 0,95			Matsumoto N, Roeloffs E.A. 2003
з	Группа скважин. Аляска	2002–2004 Скважины в слабоконсолидированных породах, пласты безнапорные. Глубина около 5 м. Ступенчатое увеличение уровня при прохождении волн от трех удаленных землетрясений.	0,59	0,11	0,93	0,13	0,92	Sil S., Freymueller J.T. 2006.

*) r – коэффициент корреляции.

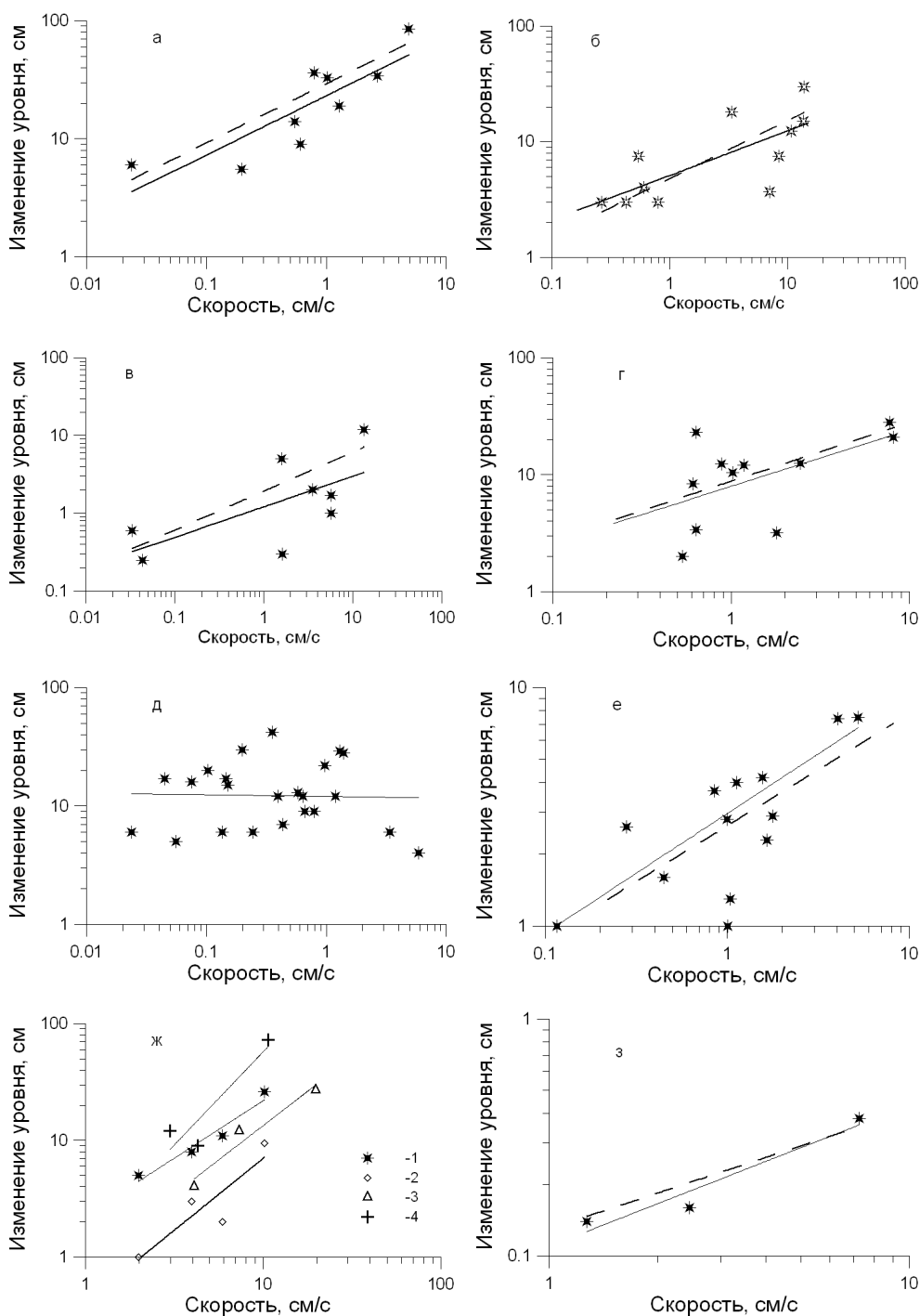


Рис. 3. Измеренные величины вариаций уровня в скважинах, расположенных в различных регионах в зависимости от максимальной массовой скорости грунта. Значки – результаты измерений, сплошные линии – наилучшее приближение степенной функцией, пунктир – наилучшее приближение зависимостью (10). Пояснения, источники данных и параметры регрессий в таблице в тексте. Последовательность расположения графиков соответствует таблице

Примеры изменения уровня можно найти в различных публикациях, в частности, в цитированных в таблице 1. Характерное время реакции скважины изменяется довольно в широких пределах – от секунд до нескольких суток и более. Хотя результаты измерений демонстрируют как увеличение, так и снижение уровня флюида в скважине в результате сейсмического воздействия, в одной и той же скважине наблюдаются, как правило, вариации одного знака. Так если в скважине Naibara наблюдалось 28 понижений уровня, соответствующих сейсмическим воздействиям [Matsumoto, Kitagawa & Roeloffs 2003], то в скважинах BV [Roeloffs, 1998] и E-1 [Копылова, 2000] уровень неизменно повышался.

На рис. 3 приведены измеренные величины вариаций уровня в нескольких скважинах, расположенных в различных регионах, в зависимости от оцененной нами по соотношению (5) максимальной амплитуды колебаний в цуге сейсмических волн от соответствующего землетрясения.

Можно видеть, что амплитуда постдинамического изменения уровня зависит как от амплитуды сейсмических колебаний, так и от конкретных гидрогеологических условий. При этом аппроксимация данных степенной функцией показывает, что для большинства скважин показатель степени b в соотношении $dh = A \cdot u_m^b$ варьирует довольно слабо и составляет величину около 0,5. Исключение составляет скважина SN-3 (рис. 3, д), которая испытывает значительные изменения уровня практически независимо от амплитуды динамического воздействия. Возможно, это связано с тем, что эта скважина расположена вблизи крупной разломной зоны [King C.-Y. и др. 1999].

Существенно более сильную зависимость вариаций уровня от амплитуды воздействия демонстрирует группа глубоких скважин в Японии [Matsumoto & Roeloffs, 2003] (рис. 3, ж). Для них аппроксимация степенной функцией дает примерно пропорциональную зависимость. Особенность этой группы скважин состоит в том, что данные для них имеются по четырем крупным землетрясениям с магнитудами M_w от 7,5 до 8,1. При этом расстояния до эпицентров не настолько велики (100–300 км), чтобы можно было пренебречь изменением поля статических напряжений, вызванным смещением в очаге.

Таким образом, можно заключить, что в большинстве случаев динамическое воздействие вызывает изменение уровня воды в скважине, которое можно приближенно описать соотношением:

$$dh = a \cdot u_m^{0.5} \quad (10)$$

Здесь dh измеряется в см, а u_m в см/с.

Соотношение (10) показано на рис. 3 пунктиром, а значение параметра a , который можно интерпретировать, как интенсивность реакции скважины на динамическое воздействие, приведено для каждой скважины в таблице 1. Можно видеть, что значения a изменяются в диапазоне от 0,13 до 29,3. При этом если исключить из рассмотрения скважину BV, которая необычайно сильно реагирует на сейсмическое воздействие, и мелкие скважины на Аляске, то диапазон интенсивностей существенно сужается – значения коэффициента a для остальных объектов лежат в диапазоне от 1,92 до 8,82.

Заключение

Анализ данных наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах, расположенных в различных геологических условиях, продемонстрировал отчетливую ре-

акцию флюидодинамического режима на динамические деформации от удаленных землетрясений. Несмотря на значительный разброс данных, можно заключить, что в большинстве случаев величина постсейсмического изменения уровня пропорциональна корню квадратному из амплитуды волны деформаций. При этом в зависимости от конкретных гидрогеологических условий интенсивность остаточных изменений уровня изменяется в пределах $1\div 5$ см/микрострейн динамической деформации, хотя наблюдаются и значительные отклонения от этого диапазона как в ту, так и в другую сторону.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-12023 ОФИ-м) и ОНЗ РАН (программа №6).

Литература

Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шариффулин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. 2000, 381 с.

Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2000. №6, с. 1–14.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина-резервуар // Вестник КРАУНЦ, Серия Науки о Земле. 2006, № 5.

Кочарян Г.Г. Механизмы восстановления прочности сейсмогенных разломов // Проблемы взаимодействующих геосфер. Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 77–87.

Осика Д.Г. Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука, 1981. 204 с.

Brodsky E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained ground water pressure changes induced by distant earthquakes. J. Geophys. Res. 2003, vol. 108, P. 2390–2400.

Elkhoury J.E., Brodsky E.E. and D. Agnew, Seismic waves increase permeability, *Nature*, 2006, vol. 441, P. 1135–1138.

Gomberg J., Felzer K., Brodsky E. Earthquake Dynamic Triggering and Ground Motion Scaling // Proc. of 4th International Workshop on Statistical Seismology. 9–13 January, 2006, Kanagawa, Japan. P. 45–51.

Grecksch G., Roth F., Kumpel H.-J. Coseismic well-level changes due to the 1992 Roermond earthquake compared to static deformation of half-space solutions // Geophys. J. Int. 1999, v. 138. P. 470–478.

Kanamori H., Brodsky E. The physics of earthquakes // Rep. Prog. Phys. 2004, vol. 67, P. 1429–1496.

King C.-Y., Asuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H. Earthquake-related water-level changes at closely clustered wells in Tono, central Japan // J. Geophys. Res., 1999, vol. 104, No B6, P. 13073–13082.

Linde A., I. Sacks, M. Johnston, D. Hill, and R. Bilham, Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity, *Nature*, 1994, vol. 371, P. 408–410.

Liu C., Huang M.-W., Tsai Y.-B. Water level fluctuations induced by ground motion of local and teleseismic earthquakes at two wells in Hualien, Eastern Taiwan // TAO, 2006, V. 17. No 2. P. 371–389.

Manga M., C.-Y. Wang. Earthquake hydrology // *Treatise on Geophysics*, 2007, vol. 2.

Matsumoto N., Kitagawa G., Roeloffs E.A. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan – I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses. Geophys. J. Int. 2003. 155, 885–899.

Matsumoto N, Roeloffs E.A. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan – II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties // *Geophys. J. Int.* 2003, 155, 899–913.

Roeloffs E.A. Persistent water changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, P. 869–889.

Sil S., Freymueller J.T. 2006. Well water level changes in Fairbanks, Alaska, due to the great Sumatra-Andaman earthquake. *Earth Planets Space* 58, 181–184.

Yang Z., Deng Z., Zhao Y., Zhu P. Preliminary study on coseismic step-like changes of water-level in the Dazhai well, Simao city, Yunnan Province // *Acta Seismologica Sinica*, V. 18, #5, pp. 611–617.