

УДК 53.082.2+532.546+551.491.5

ДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов

ИДГ РАН

Реакция подземных вод на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений рассматривается в качестве основного индикатора, соответствующего динамике деформирования флюидонасыщенного коллектора. По данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод в напорном водоносном горизонте за период наблюдений 2008–2017 гг. выделены гидрогеологические отклики от 11 землетрясений с магнитудами 7.1–9.1, в безнапорном водоносном горизонте на протяжении 2013–2017 гг. – от 36 землетрясений с магнитудами 6.2–8.2. Сравнительный анализ зарегистрированных вариаций уровня в высокочастотной и низкочастотной областях позволил установить 3 типа гидрогеологических эффектов. Первые два типа, которые определены в ограниченном и широком диапазонах частот, соответствуют косейсмическим вариациям уровня, синхронным смещению грунта от землетрясений. Третий тип – постсейсмические необратимые изменения уровня подземных вод могут быть связаны с нарушением структуры порово-трещинного пространства.

DOI

Общие сведения

Механизм деформирования флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии недостаточно исследован [Peng, Gomborg, 2010; Кочарян, 2016]. Изучение основных закономерностей изменения состояния флюидонасыщенного коллектора на разных эпицентральных расстояниях от очага землетрясения является актуальной задачей на современном этапе исследований.

Гидрогеодинамические эффекты, проявляющиеся в виде косейсмических и постсейсмических откликов на прохождение сейсмических волн, могут рассматриваться в качестве основных индикаторов как динамического, так и необратимого изменения структуры трещино-порового пространства [Cooper et al., 1965; Киссин, 2015]. Гидрогеодинамические эффекты различают по времени их проявления: предшествующие толчку (предвестники), сопутствующие (косейсмические) и последующие (постсейсмические).

Наряду с этой систематизацией в работе [Копылова и др., 2012] предложен термин – «гидрогеосейсмические вариации», которые представляют сигналы в изменениях временных рядов уровня воды, вызванные сильными землетрясениями, и приведена их типизация. К типам: I – отнесен гидрогеодинамический предвестник землетрясения, II – косейсмические скачки уровня воды, III – постсейсмическое снижение уровня, IV – вариации уровня, связанные с динамическим воздействием землетрясений.

В свою очередь зарубежными коллегами [Shi et al., 2015] среди косейсмических и постсейсмических откликов выделены динамические вариации уровня – осцилляции, постепенные и внезапные (ступенчатые) изменения уровня, которые могут сопровождаться осцилляцией и остаточными эффектами. Например, ступенчатый косейсмический подъем уровня в одной из наблюдательных скважин в Китае, вызванный прохождением волн от землетрясения Тохоку (11.03.2011 г.), отмеченный в диапазоне периодов свыше 60 с, указывает на изменение фильтрационных свойств коллектора, которое подтверждено изменением значения фазового сдвига между приливной волной M_2 , прослеженной в смещении грунта и уровне подземных вод [Sun et al., 2015]. В статьях [Kitagawa et al., 2011; Sun et al., 2018] анализ частотных характеристик зарегистрированных гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений использован для оценки параметров пласта.

В работе [Brodsky et al., 2003] отмечено, что значение амплитудного фактора, рассчитанное как отношение амплитудных спектров вариаций уровня и скорости смещения грунта до и после землетрясения для периодов ниже 20 с, является частотно-зависимым. В статье [Lie et al., 2006] сопоставлены и проанализированы амплитудные спектры вариаций уровня и сейсмограммы землетрясения, произошедшего у западного побережья Северной Суматры (26.12.2004 г.), и его афтершока (28.03.2005 г.).

Систематизация многочисленных гидрогеологических эффектов с учетом частотных характеристик рассматриваемых водоносных горизонтов не разработана.

В данной работе предложена типизация зарегистрированных гидрогеологических эффектов на основе анализа реакции подземных вод в высоко- и низкочастотной областях (в диапазоне до 60 с и более). В качестве исходных данных использована сформированная база гидрогеологических откликов на территории ГФО «Михнево» на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений за период наблюдений 2008–2017 гг.

Методика работ

На территории ГФО «Михнево» проводится прецизионный мониторинг уровня подземных вод в двух скважинах с использованием прецизионных датчиков уровня LMP308i. Точность регистрации уровня с частотой 1 Гц составляет 1,7 мм. Наблюдения за режимом напорного горизонта, вскрытого в интервале 92–115 м, осуществляются с февраля 2008 г., за безнапорным горизонтом в интервале 42,6–56,2 м с июля 2013 г. Регистрация сейсмических данных ведется широкополосными сейсмометрами STS-2 и CM-3-E, установленными в шахте на глубине 20 м. Для сопоставления с гидрогеологическими данными частота опроса сейсмических данных 100 Гц приведена к 1 Гц. В результате ранее проведенной обработки имеющейся базы данных реакции подземных вод на землетрясения экспериментально определен нижний порог скорости регистрации сейсмических событий ($\geq 0,1$ мм/с) в вариациях уровня подземных вод [Горбунова и др., 2015], который в дальнейшем использован для формирования сводной таблицы гидрогеологических откликов на территории ГФО «Михнево» от землетрясений. Основные параметры землетрясений (время прихода продольной волны на станцию Обнинск, глубина и магнитуда) взяты из каталога Единой геофизической службы РАН (www.ceme.gsras.ru). Дополнительно выполнена оценка эпицентрального расстояния, двойной амплитуды скорости смещения грунта и уровня подземных вод.

Для типизации гидрогеологических откликов от землетрясений и выделения постсейсмических гидрогеологических эффектов, регистрируемых после вступления группы поверхностных волн на стадии свободной осцилляции грунта, связанной с затуханием сейсмического сигнала, данные регистрации уровня и скорости смещения грунта рассмотрены в двух диапазонах с периодами менее и более 60 с для 6 часовых интервалов. По сейсмическим и гидрогеологическим данным (за 3 часа до прихода волны на станцию и 3 часа после) рассчитывалось спектральное отношение записи землетрясений для удаления влияния локальных особенностей расположения станции. По каждому спектру определялись значения рассматриваемых параметров (амплитуда, частота), которые одновременно выделялись в записи скорости грунта и вариациях уровня напорного и безнапорного горизонтов на одних и тех же частотах (с точностью до 4 отсчетов). При последующем делении спектра уровня воды на спектр скорости грунта на определенных ранее частотах определялся коэффициент усиления – амплитудный фактор, который является параметром отклика уровня воды в скважине на прохождение сейсмических волн от землетрясений [Brodsky et al., 2003; Besedina et al., 2016]. Применение подобного подхода к обработке данных позволило дополнительно выделить отклик напорного водоносного горизонта на два землетрясения, которые произошли в Непале (25.04.2015 г.) и в Таджикистане (07.12.2015 г.). Вместе с тем не для всех землетрясений был определен амплитудный фактор. Для напорного горизонта – рассчитан для 7 сейсмических событий из 11 зарегистрированных, для безнапорного – для 28 землетрясений из 36.

При двойной амплитуде скорости смещения грунта, определенной по спектру, не превышающей 0,6 мм/с для напорного водоносного горизонта и 0,2 мм/с для безнапорного, не установлена синхронизация по частоте спектров уровня воды и скорости грунта. Также амплитудный фактор не выделен для землетрясений, произошедших на глубинах более 70 км за исключением 3 землетрясений (26.10.2015 г. в Афганистане, 22.01.2017 г. в районе Соломоновых островов и частично 08.09.2017 г. в Мексике).

Таблица

**Список событий, отклик которых зарегистрирован в скважинах
ГФО «Михнево»**

№	Дата	Время, ОВН	Глубина, км	Магнитуда	Расстояние, км	Двойная амплитуда		Регион
						ско- рость, мм/с	уро- вень, мм	
Напорный водоносный горизонт								
1	2010-02-27	06:53:19.7	23	8.8	14464	1.79	14.9	Поб. Центрального Чили
2	2011-03-11	05:57:17.2	20	9.1	7467	3.78	41.5	Вост. поб. о.Хонсю, Япония
3	2011-10-23	10:45:18.6	15	7.1	1864	1.51	7.0	Турция
4	2012-04-11	08:49:41.1	25	8.6	7764	2.51	19.4	Зап. поб. Сев. Суматры
5	2012-10-28	03:15:31.9	20	7.8	8029	0.39	6.0	Р-н о-ов Королевы Шарлот- ты
6	2013-04-16	10:50:44.6	70	7.7	3563	1.01	6.3	Юго-Западный Пакистан
7	2013-05-24	05:53:59.8	600	8.3	6492	0.77	3.5	Охотское море
8	2015-09-16	23:13:29.5	25	8.3	14026	0.58	3.0	Поб. Центрального Чили
9	2017-09-08	05:02:50.4	70	8.2	11024	2.46	8.0	Поб. Чьяпас, Мексика
Безнапорный водоносный горизонт								
1	2013-09-28	07:40:58	7.7	6.8	3802	0.34	10.7	Пакистан
2	2014-02-12	09:26:55.8	6.9	6.9	3978	0.14	6.0	Южный Синьцзян, Китай
3	2014-04-02	00:05:29.2	20	8.1	12961	0.42	15.1	Поб. Северного Чили
4	2014-04-03	03:01:57.6	20	7.7	13009	0.32	13.3	Поб. Северного Чили
5	2014-04-12	20:33:26.9	10	7.6	13189	0.20	9	Соломоновы о-ва
6	2014-05-24	09:28:51.4	10	6.9	1863	0.62	–	Эгейское море
7	2014-11-22	13:19:08.3	10	6.2	7351	0.11	4.8	Вост. поб. о.Хонсю, Япония
8	2015-04-25	06:19:30.5	13	7.9	4783	0.66	29.2	Непал
9	2015-04-26	07:17:22.1	10	6.7	4897	0.22	10.3	Непал
10	2015-05-12	07:13:32	15	7.2	4901	0.87	38.1	Непал
11	2015-05-30	11:33:36.7	680	7.9	8279	0.11	3.8	Р-н о-ва Бонин, Япония
12	2015-07-03	01:14:20.4	20	6.4	3596	0.23	10.2	Южный Синьцзян, Китай
13	2015-09-16	23:13:29.5	25	8.3	14026	0.58	23.1	Поб. Центрального Чили
14	2015-10-26	09:15:19.7	215	7.5	3240	0.39	14.2	Р-н Гиндукуш, Афганистан
15	2015-11-13	21:02:24.7	10	6.8	7309	0.33	12.6	Северо-зап. о-ов Рюкю
16	2015-11-17	07:14:34.7	10	6.5	2221	0.16	5.5	Греция
17	2015-12-07	07:56:09.0	33	7.2	3206	0.82	35.0	Таджикистан
18	2016-01-24	10:40:55.9	130	7.1	7260	0.055	3.5	Южная Аляска
19	2016-03-02	13:01:35.8	10	7.8	8422	0.18	9	Юго-зап. Суматры, Индо- незия
20	2016-04-15	16:35:52	10	7.0	7287	0.29	9.2	о. Кюсю, Япония

Продолжение табл.

№	Дата	Время, OBN	Глубина, км	Магнитуда	Расстояние, км	Двойная амплитуда		Регион
						ско- рость, мм/с	уро- вень, мм	
21	2016-04-16	00:12:12.8	20	7.8	11698	0.21	3.8	Поб. Эквадора
22	2016-06-26	11:23:10.6	15	6.4	3145	0.11	4.4	Таджикистан
23	2016-10-30	6:44:45.8	10	6.6	2237	0.25	8.2	Центральная Италия
24	2016-11-13	11:22:33.8	10	7.8	16507	0.16	10.2	Южные о-ва, Нов. Зеландия
25	2016-11-21	21:10:45.3	10	6.9	7482	0.25	9	Вост. поб. Хонсю
26	2016-12-08	17:57:29.1	33	7.8	13079	0.58	23	Соломоновы острова
27	2016-12-25	14:41:41.0	33	7.6	15079	0.22	8.8	Южное Чили
28	2017-01-22	04:48:37.0	150	7.9	12265	0.35	13.3	Соломоновы о-ва
29	2017-06-12	12:32:43.7	12	6.3	1975	0.31	10.2	Эгейское море
30	2017-07-17	23:44:45.8	10	7.7	7082	0.34	13.2	Командорские о-ва, Россия
31	2017-07-20	22:35:34.3	10	6.6	2152	0.23	6.1	о-ва Додеканес, Греция
32	2017-08-08	13:28:51.8	16	6.5	5571	0.08	3.9	Ганьсу, Китай
33	2017-08-08	23:34:10.8	27	6.3	3395	0.33	13.7	Сев. Синьцзян, Китай
34	2017-09-08	05:02:50.4	70	8.2	11024	2.46	110.6	Поб. Чьяпас, Мексика
35	2017-09-19	18:28:04.4	50	7.1	10873	0.15	7.7	Поб. Чьяпас, Мексика
36	2017-11-12	18:23:00.0	20	7.4	2315	0.52	18.3	Ирак

Результаты исследований и обсуждение

За период прецизионных наблюдений с 2008 по 2017 гг. в уровне подземных вод прослежены гидрогеологические отклики на землетрясения с магнитудами от

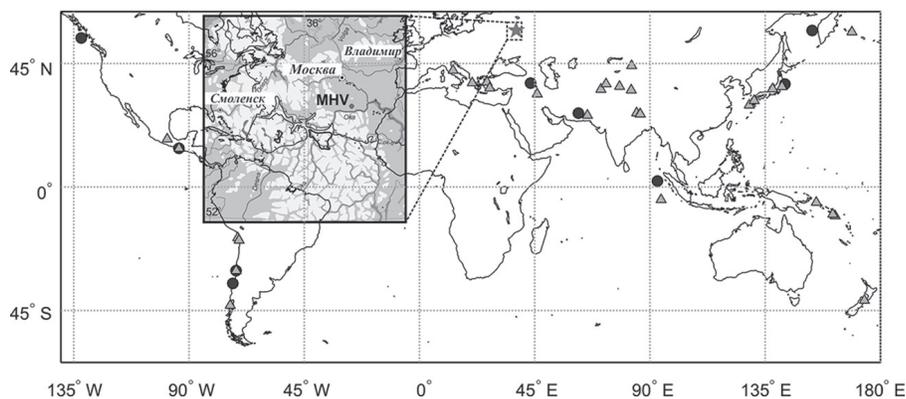


Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений, которые зарегистрированы в вариациях уровня напорного (черные кружки) и безнапорного (серые треугольники) водоносных горизонтов на территории ГФО «Михнево» (MHV) (звездочка)

6.2 до 9.1, произошедшие в разных регионах мира на эпицентральных расстояниях от 1863 до 16507 км от ГФО «Михнево» (рис. 1).

Предварительный сравнительный анализ полученных данных в высокочастотной и низкочастотной областях позволил выделить 3 типа гидрогеологических эффектов, связанных с прохождением сейсмических волн [Gorbunova et al., 2018]. К первому типу отнесены динамические вариации уровня, которые ограниченно выделяются только в высокочастотной или только в низкочастотной области (в диапазоне до 60 с и более) на фоне шума (рис. 2, а). Второй тип представлен динамическими вариациями, проявляющимися в широком диапазоне частот (рис. 2, б). Первый и второй типы соответствуют косейсмическим вариациям уровня подземных вод и синхронны смещению грунта, вызванному прохождением сейсмических

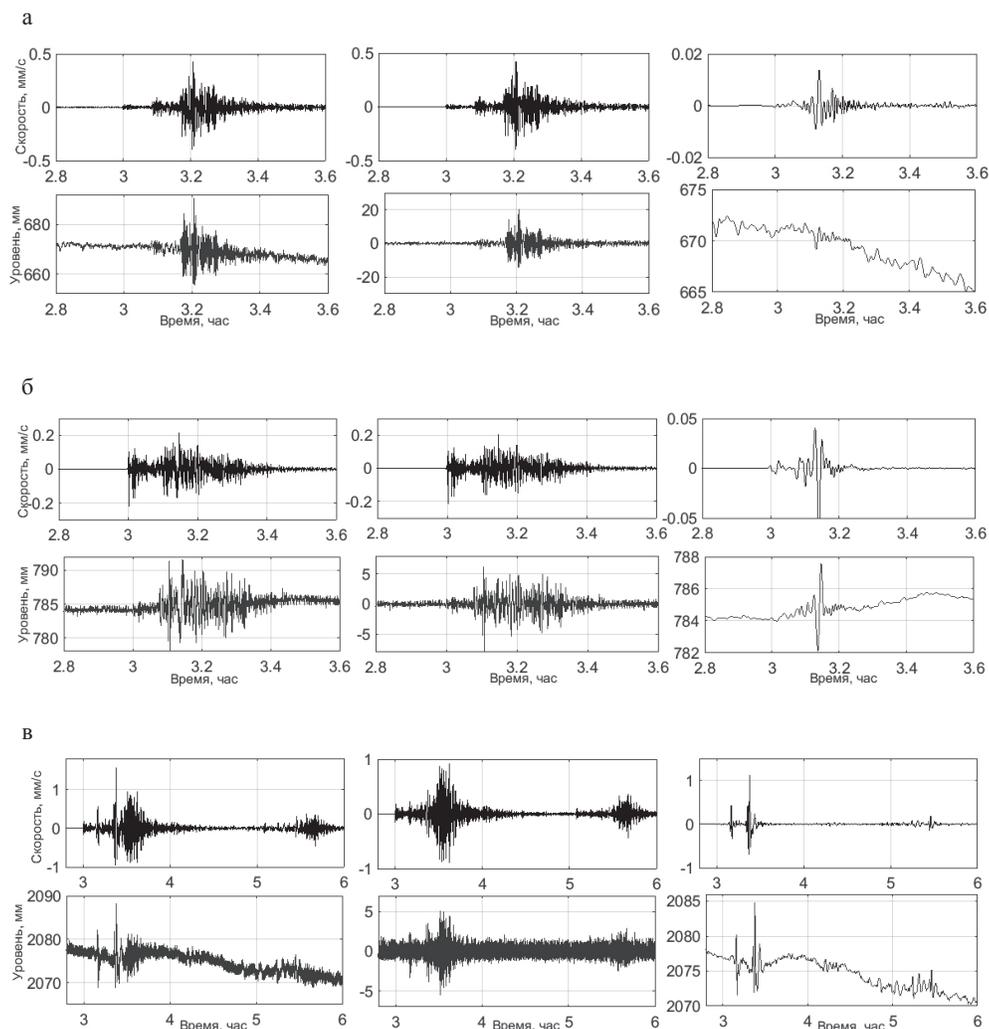


Рис. 2. Сейсмограммы и диаграммы уровня подземных вод при землетрясениях, произошедших в Таджикистане (07.12.2015 г.) М 7.2 (а), в районе Гиндукуша, Афганистан (26.10.2015 г.) М 7.5 (б) и у западного побережья Северной Суматры (11.04.2012 г.) М 8.6 (в). Слева – исходные данные, в центре – выделены в диапазоне периодов до 60 с, справа – в диапазоне периодов более 60 с

волн. Амплитуды косейсмических вариаций уровня составили 41.5 мм в напорных условиях и 110.6 мм в безнапорных.

Третий тип гидрогеологических эффектов представлен остаточными изменениями уровня, которые прослежены в низкочастотной области в виде плавного постсейсмического подъема уровня, устойчиво выраженного в низкочастотном диапазоне от 60 с и более (рис. 2, в). Максимальная амплитуда постсейсмического подъема уровня составила ~ 15 мм для землетрясения Тохоку, Япония (11.03.2011 г.).

Подобные эффекты выделены в вариациях уровня напорного горизонта в диапазоне низких частот после землетрясений у побережий Северной Суматры (11.04.2012 г.), Центрального Чили (27.02.2010 г.) и Мексики (08.09.2017 г.). После Суматранского землетрясения установлен подъем уровня в течение ~23 мин, после Чилийского – на протяжении 18 мин. Общий тренд изменения уровня подземных вод может привести как к уменьшению, так и к увеличению амплитуд и продолжительности динамических вариаций уровня, вызванных прохождением сейсмических волн от землетрясений.

На следующем этапе исследований построены диаграммы амплитудных факторов, рассчитанные для напорного (рис. 3, а) и безнапорного (рис. 3, б-г) водоносных горизонтов, с учетом приуроченности очагов землетрясений к различным сейсмическим поясам.

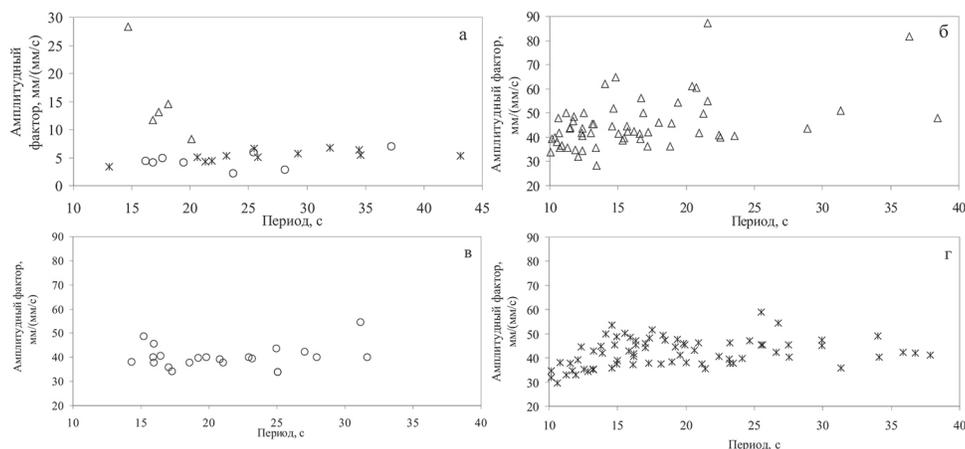


Рис. 3. Зависимость амплитудного фактора от периода сейсмического воздействия от землетрясений Средиземноморско-Трансазиатского пояса (треугольники), восточной (кружки) и западной (крестики) ветвей Тихоокеанского (кружки); а – напорный, б-г – безнапорный водоносные горизонты

Для напорного горизонта амплитудный фактор определен для 7 землетрясений из 11, выделенных в вариациях уровня. Значения амплитудного фактора напорного горизонта от землетрясений, произошедших в пределах Трансазиатского и Тихоокеанского сейсмических поясов, различаются. В первом случае в диапазоне периодов 15–20 с значение амплитудного фактора изменяется от 8 до 28 мм/(мм/с). Во втором, в интервале периодов 13–37 с значение амплитудного

фактора от землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса плавно увеличивается от 3 до 7 мм/(мм/с).

В диапазоне периодов 25,4–25,8 и 34,5–34,6 с значения амплитудных факторов от землетрясений Тохоку (11.03.2011 г.) и вблизи побережья Суматра (11.04.2012 г.) совпадают (рис. 3, а). Минимальные значения амплитудного фактора 2,2 и 2,7 мм/(мм/с) на периодах 24 и 28 с от землетрясения вблизи побережья Мексики (08.09.2017 г.) установлены через 7,5 лет после последней регистрации. Возможно, подобное различие значений амплитудного фактора при сопоставимых скоростях смещения грунта косвенно подтверждает постсейсмическое изменение свойств флюидонасыщенного коллектора. Для безнапорного горизонта амплитудный фактор определен для 28 землетрясений из 36. Для 10 событий Средиземноморско-Транс-азиатского пояса на относительно близких эпицентральных расстояниях от 1975 до 4901 км амплитудный фактор характеризуется большим диапазоном значений от 22 до 65 мм/(мм/с) преимущественно в области периодов 10–24 с (рис. 3, б). Проследить какие-либо закономерности динамических вариаций флюидонасыщенного коллектора на данном этапе исследований не представляется возможным. Следует отметить, что для глубокого землетрясения в Афганистане (26.10.2016 г.) выделено наибольшее количество периодов синхронизации отношений спектров гидрогеологических и сейсмических сигналов, в диапазоне периодов 20–22 с отмечено увеличение амплитудного фактора. Значения амплитудного фактора для 5 землетрясений, произошедших у побережий Чили (01–03.04.2014, 19.06.2015, 25.12.2016 гг.) и Эквадора (16.04.2016 г.), в пределах восточной ветви Тихоокеанского пояса изменяются от 32 до 42 мм/(мм/с) в диапазоне периодов 14–30 с (рис. 3, в). Амплитудный фактор для 10 землетрясений, приуроченных к западной ветви Тихоокеанского пояса, варьирует от 30–38 до 46 мм/(мм/с) для периодов 10–38 с (рис. 3, г). Увеличение значений амплитудного фактора отмечено от землетрясений, произошедших 02.03.2016 г. в районе острова Суматра, 13.11.2016 г. – у Южных островов, 12.04.2014 и 22.01.2017 гг. – вблизи Соломоновых островов. Для отдельных землетрясений амплитудный фактор изменяется от 33 до 67 мм/(мм/с) в диапазоне периодов от 43 до 81 с. За исключением данных регистрации землетрясения, произошедшего в районе Соломоновых островов 22.01.2017 г., при котором в области периодов 41–144 с значения амплитудного фактора не превышали 33–38 мм/(мм/с).

В целом, распределение амплитудного фактора напорного и безнапорного горизонтов за рассматриваемый период наблюдений является частотно независимой функцией и косвенно указывает на динамическое деформирование флюидонасыщенного коллектора. Для некоторых сейсмических событий отмечено увеличение значения амплитудного фактора в определенных интервалах периодов. Более низкие значения амплитудного фактора напорного горизонта по сравнению с безнапорным может быть обусловлено различием фильтрационных характеристик, так как по данным предварительного гидрогеологического опробования водоносных горизонтов водопроницаемость безнапорного горизонта составляет $15 \text{ м}^2/\text{сут}$, напорного – $4 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Рассмотренные значения амплитудных факторов не противоречат опубликованным данным, полученным в сейсмоактивных регионах. В работе [Brodsky et al., 2003] получены постоянные значения амплитудного отклика $\sim 200 \text{ м}/(\text{мм}/\text{с})$ для периодов 20–60 с от удаленных землетрясений на эпицентральных расстояниях 5000–12500 км. В наблюдательной скважине радиусом 0,06 м вскрыт водоносный горизонт с напором 83 м и коэффициентом фильтрации $0,006 \text{ м}/\text{сут}$, приуроченный к трещиноватому гранодиориту. Приведенное значение в 4–10 раз превышает

амплитудный фактор напорного горизонта, определенный по результатам прецизионного мониторинга, проводимого в платформенных условиях.

На территории ГФО «Михнево» водовмещающие породы представлены трещиноватыми известняками с более высоким коэффициентом фильтрации 0,17 м/сут. Водоносный горизонт имеет значительно меньший напор (23 м) при сопоставимом радиусе скважины 0,06 м. Это подтверждает зависимость коэффициента усиления напорной системы от фильтрационных свойств водоносного горизонта, что согласуется с [Cooper et al., 1965].

Подобная теория не может быть применена для безнапорной системы, но отметим, что водопроницаемость безнапорного горизонта выше относительно напорного горизонта в 3,7 раза, а коэффициент усиления – в 6 раз. Кроме того, два водоносных горизонта на территории ГФО «Михнево» характеризуются различными условиями распространения (радиальным и латеральным направлениями подземного стока), градиентами подземного потока, глубиной скважины и вскрытым интервалом. Все эти эффективные параметры пласта, вероятно, влияют на реакцию подземных вод при прохождении сейсмических волн.

Заключение

Изменение состояния флюидонасыщенного коллектора под действием сейсмических колебаний может рассматриваться в качестве одной из современных «ступенек» трансформации сложнопостроенной геологической среды на микроуровне. Упругое деформирование флюидонасыщенного коллектора подтверждено синхронизацией вариаций уровня и скорости смещения грунтов в высокочастотном диапазоне. Дополнительное прослеживание реакции подземных вод в области низких частот, вероятно, свидетельствует о квазиупругом (хрупко-пластичном) деформировании коллектора. Наличие постсейсмических эффектов соответствует необратимому изменению структуры трещинно-порового пространства.

Подземные воды могут являться как индикатором состояния флюидонасыщенного коллектора, так и реагентом, провоцирующим изменение структуры коллектора трещинно-порового типа. Интенсивность гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн зависит не только от параметров самого землетрясения и водоносного горизонта, но и от фонового тренда уровня подземных вод.

В платформенных относительно стабильных условиях интенсификация антропогенной нагрузки способствует активизации природно-техногенных процессов. Гидрогеологические отклики на удаленные катастрофические землетрясения могут рассматриваться в качестве возможных триггеров, приводящих к изменению состояния флюидонасыщенных коллекторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (проект № АААА–А17–117112350020-9).

Литература

Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Реакция подземных вод на прохождение сейсмических волн от землетрясений на примере ГФО «Михнево» // Динамические процессы в геосферах. Вып.7. М. : ГЕОС. 2015. С. 60–67.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М. : Наука. 2015. – 328 с.

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

Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 424 с.

Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I. Chilen Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform // Pure and Applied Geophysics. Vol.173. N2. 2016. P. 321–730.

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. Vol. 108. 2003. P. 2390–2400.

Cooper H.H., Bredehoeft J.J., Papadopoulos I.S. and Bennett R.R. The Response of Well-Aquifer Systems to Seismic Waves // Journal of Geophysical Research. Vol.70. No.16. August 15, 1965. P. 3915–3926.

Gorbunova E.M., Besedina A.N. and Vinogradov E.A. Water level response recorded at Russian Platform to remote earthquakes // SGEM2018 Conference Proceedings 18. 2018. P. 59–766.

Kitagawa Y., Itaba S., Matsumoto N. and Koizumi N. Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high frequency domain // Journal of Geophysical research. Vol. 116. B08301.2011. P. 1–12.

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

Peng Z., Gombert J. An integrated perspective o the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature geosciences. V.3. 2010. P. 599–607.

Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes - insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // Earth and Planetary Science Letters. 430. 2015. P. 66–74.

Sun X., Wang G., Yang X. Coseismic response of water level in Changping well, China, to the Mw 9.0 Tohoku earthquake // Journal of Hydrology. 531. 2015. P. 1028–1039.

Sun X., Xiang Y., Shi Z. Estimation the hydraulic parameters of a confined aquifer based on the response of groundwater levels ti seismic Rayleigh waves // Geophys. J. Int. 213. 2018. P. 919–930.