

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

*Е.А. Виноградов, Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян,
Д.В. Павлов, И.С. Свинцов*

В статье приведены результаты мониторинга уровня воды в скважине, вскрывающей напорный водоносный горизонт, на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». В составе периодических колебаний уровня выделены гармонические ряды, обусловленные изменением состояния геологической среды под влиянием лунно-солнечных приливов. В рядах измерений с шагом 1 с прослежен гидрогеологический отклик на сейсмические события – землетрясения с магнитудой свыше 7 баллов.

Общие сведения

Геофизическая обсерватория ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») расположена в юго-западной части Московского артезианского бассейна вне зоны активного техногенного воздействия. Климат в районе ГФО «Михнево» относится к умеренно континентальному с холодной зимой и умеренно теплым летом. На протяжении 2008–2010 гг. атмосферное давление изменялось от 945 до 1005 гПа, годовые перепады достигают 50–70 гПа. Летние периоды наблюдений характеризуются незначительными вариациями давления в пределах 20 гПа в отличие от зимних (рис. 1).

На территории ГФО «Михнево» мониторинг режима подземных вод организован в наблюдательной скважине, вскрывающей напорный водоносный горизонт в интервале 76–115 м. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми известняками нижнего карбона с подчиненными прослоями мергеля и доломита. Водоносный горизонт характеризуется относительно невысокими значениями коэффициента фильтрации, упругой водоотдачи и является информативным для постановки прецизионных измерений [Кочарян и др., 2008].

Режим подземных вод естественный равнинного типа с сезонными вариациями пьезометрической поверхности. Прослеживается закономерная тенденция к подъему пьезометрической поверхности в паводок (весенне-осенний периоды), снижение – в летнюю и зимнюю межень. На протяжении 2008–2010 гг. амплитуды годовых вариаций уровня составили 2,1–2,5 м. Максимально высокое положение уровня зафиксировано в июле 2008 г. на глубине 67,2 м, низкое значение – 70,3 м в ноябре 2009 г. Скорости изменения уровня подземных вод варьируют в пределах ± 5 см/сут. В периоды сезонного питания водоносного горизонта превышают ± 10 см/сут.

Методика исследований

С февраля 2008 г. в измерительной скважине, расположенной на территории ГФО «Михнево», проводятся регулярные прецизионные наблюдения за уровнем подземных вод с использованием датчика LMP308i (Германия) синхронно с измерениями атмосферного давления. Интервал опроса параметров составляет 1 с, точ-

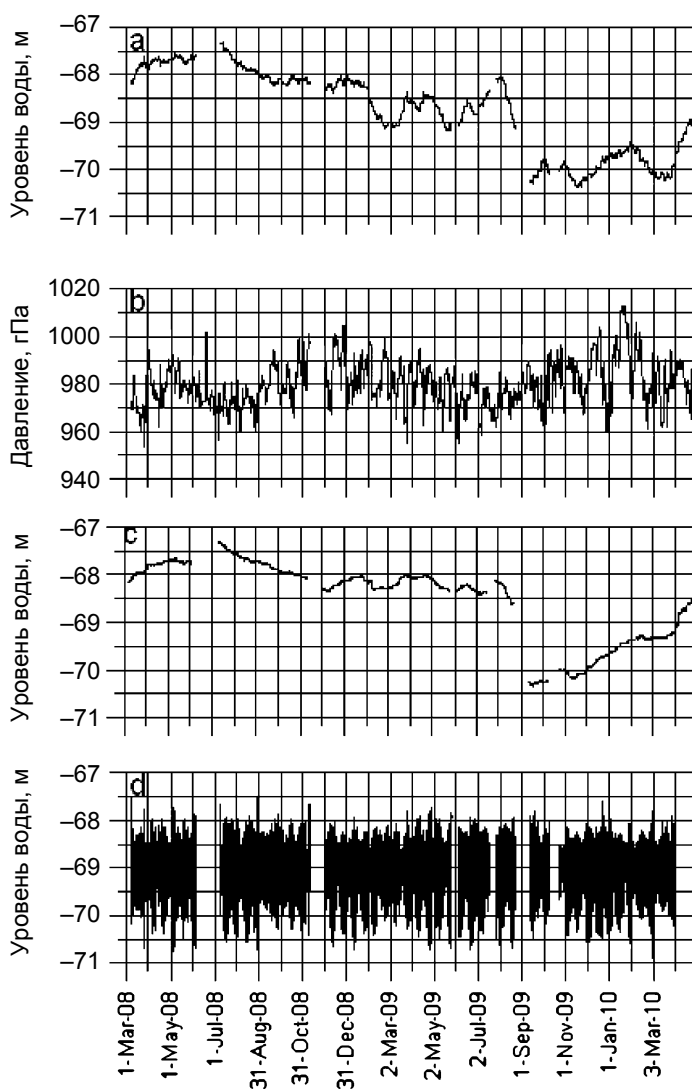


Рис. 1. Результаты наблюдений.

(a, b) – экспериментальные данные: а – уровень подземных вод, б – атмосферное давление; (c, d) – данные обработки: с – уровень, очищенный от атмосферного давления, d – приливообразующая составляющая

ность регистрации уровня – 0,1 мм, атмосферного давления – 0,1 гПа. Регистрация уровня эпизодически прерывалась по техническим причинам, в частности, в ноябре 2008 г. в связи с проведением откачки.

Предварительно, в связи с большим объемом накопленных данных и постоянным пополнением временных рядов, результаты наблюдений за вариациями атмосферного давления и уровня подземных вод децимированы с интервалом 1 час. Исходные параметры отфильтрованы от длиннопериодной составляющей (периоды длиннее 26 часов) и влияния атмосферного давления. Значения объемной дефор-

мации водовмещающих пород и приливного гравитационного потенциала рассчитаны по программе, изложенной в статье [Кабыченко, 2008]. Приливообразующая составляющая в составе объемной деформации пород выделена с использованием программы ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]. Для анализа взаимосвязи между вариациями уровня воды и объемной деформации пород, обусловленной влиянием лунно-солнечных приливов, построены временные спектрограммы (далее Т-Р спектры).

Очистка рядов прецизионных ежесекундных измерений уровня подземных вод от влияния атмосферного давления проведена посуточно. Сводная диаграмма результатов наблюдений за режимом подземных вод, составленная из суточных записей, использована для выделения гидрогеологического отклика на землетрясения. Информативные ряды ежесекундных измерений, соответствующие времени прохождения сейсмических волн, дополнительно отфильтрованы от высокочастотного шума в диапазоне 5–200 сек. Для сравнительного анализа гидрогеологического отклика на землетрясения привлечены результаты регистрации сейсмических событий цифровой станцией «Reftek», расположенной в шахте на территории ГФО «Михнево».

Стационарные вариации уровня подземных вод под влиянием лунно-солнечных приливов

В условиях стационарной фильтрации подземных вод в системе «напорный водоносный горизонт – открытая скважина» изменение уровня воды под действием перепадов атмосферного давления и влияния лунно-солнечных приливов обусловлено деформацией водовмещающих пород за счет дополнительного (наведенного) эффективного напряжения. Вариации атмосферного давления и уровня подземных вод изменяются в противофазе (рис. 1), изменение объемной деформации водовмещающих пород под влиянием лунно-солнечных вариаций приводит к синхронным колебаниям уровня подземных вод (рис. 2). Гидрогеологический отклик на лунно-солнечные приливы может рассматриваться в качестве зондирующего сигнала для диагностики напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Фильтрация уровня от длиннопериодной составляющей и атмосферного давления позволяет выделить малоамплитудные периодические колебания подземных вод, обусловленные действием лунно-солнечных приливов (рис. 1). Приливообразующая составляющая в уровне подземных вод стабильна за весь период наблюдений. Амплитуды гармонических колебаний варьируют в пределах $\pm 1,5$ мм.

В составе рассматриваемых гармоник волн приливообразующей составляющей наиболее значимо выражены суточные и полусуточные вариации уровня подземных вод, характеризующиеся неравномерной изменчивостью на протяжении годового цикла наблюдений. На представленных, в качестве примера, Т-Р спектрах уровня подземных вод и объемной деформации водовмещающих пород, рассчитанных по децимированным значениям по состоянию на февраль–март 2008, август–ноябрь 2008 и декабрь 2008 – март 2009 гг., видно, что экстремумы суточных и полусуточных гармоник смещены (рис. 2).

Для полусуточных гармоник амплитуда объемной деформации пород и, соответственно, амплитудный спектр уровня выражены слабее в зимний период (декабрь 2008 – январь 2009 гг.). Напротив, в весенне-осенний периоды (март–апрель, сентябрь–октябрь 2008 г.) диапазон частот полусуточных гармоник объемных деформаций в периоды ново- и полнолуний увеличивается, амплитуды составляют 3 нанострейна. Вариации гидрогеологического отклика полусуточных гармоник соответствуют изменениям объемной деформации и не превышают 3 мм.

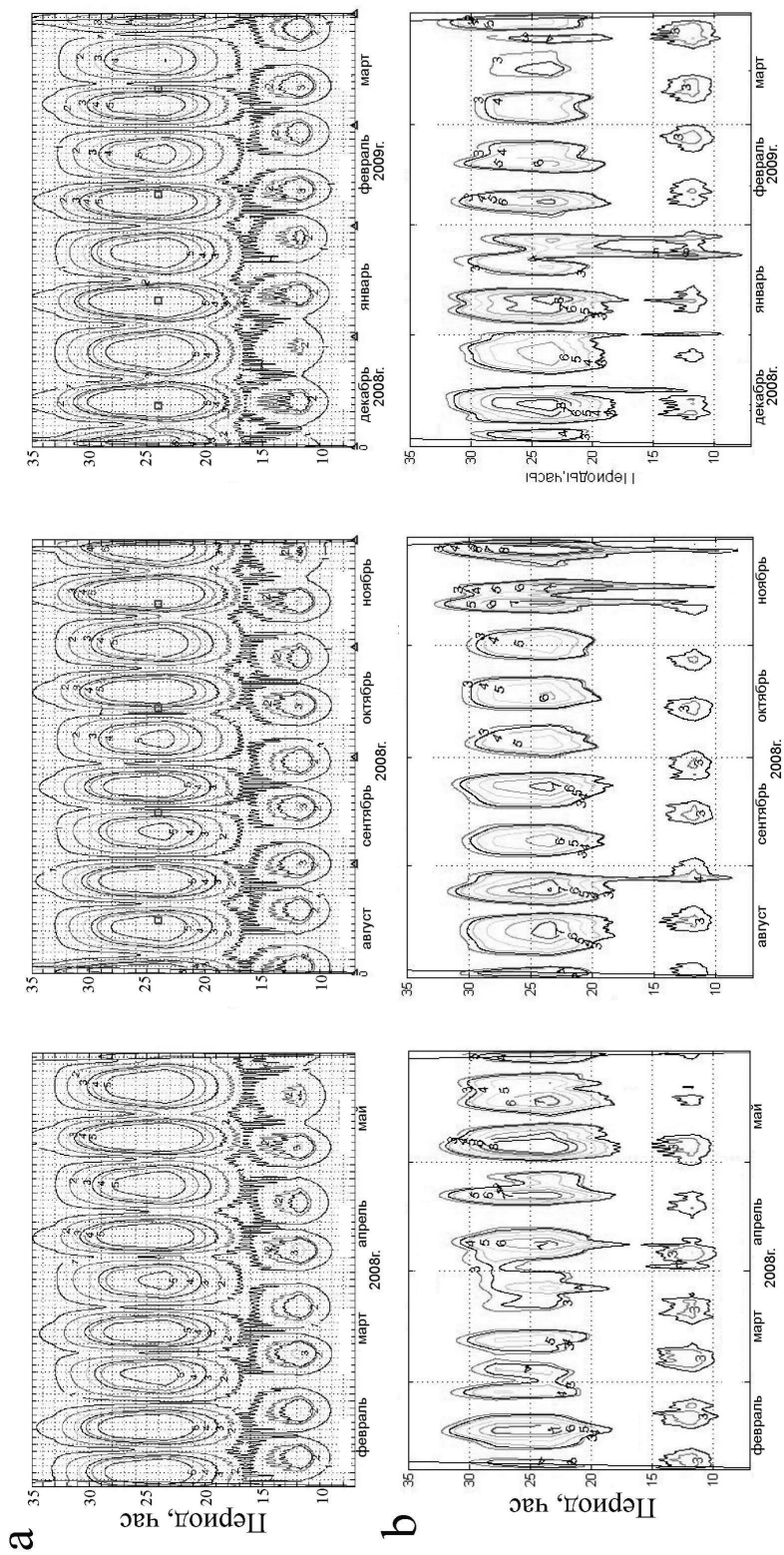


Рис. 2. Т-Р спектр.

(а) – объемная деформация пород, обусловленная лунно-солнечными приливами, 10^{-9} ; (б) – приливы в уровне, мм

На протяжении годового цикла наблюдений амплитуда объемной деформации пород для суточных гармоник волн стабильна (до 6 нанострейнов) по сравнению с диапазоном периодов объемной деформации, который возрастает от 22,5–25,5 до 20–30 часов весной и осенью.

В августе–ноябре и декабре 2008 – марте 2009 гг. экстремумы гидрогеологического отклика, в целом, соответствуют диапазонам увеличения объемной деформации пород. Максимально высокие значения амплитуд суточных гармоник вариаций уровня зафиксированы летом (август 2008 г.) и зимой (декабрь 2008 – январь 2009 гг.) и превышают 7 мм. На рубеже март–апрель 2008 г. значение объемной деформации водовмещающих пород минимально. Выраженность приливов в вариациях уровня «размыта», находится в пределах точности определения. Т-Р спектр за ноябрь 2008 г. «зашумлен» из-за техногенного нарушения режима подземных вод в связи с проведением откачки и отличается наличием гармоник с амплитудами, перекрывающими значения полусуточных и суточных вариаций.

В течение апреля–мая 2008 г. отмечено расхождение между положением экстремумов гидрогеологического отклика и теоретически рассчитанными значениями объемной деформации. Вероятно, установленное несоответствие указывает на наличие дополнительного фактора, присутствующего в составе выделенных гармоник приливных волн, несмотря на выполненную фильтрацию сигнала от влияния длиннопериодной составляющей и атмосферного давления.

Следует отметить, что период наблюдений с середины марта до начала июня 2008 г. характеризуется общим трендом восстановления пьезометрической поверхности, наиболее интенсивно выраженным с 15 марта по 15 апреля 2008 г. (рис. 1). Поэтому в качестве неучтенного фактора может рассматриваться изменение скорости подземного потока. В ежесекундных данных вариаций уровня на протяжении марта–апреля 2008 г., отфильтрованных от давления, наряду с отчетливо проявляющейся приливной составляющей вариаций уровня прослеживается интенсивное приращение уровня на 20 см за относительно короткий промежуток времени в течение суток.

Гидрогеологический отклик на землетрясение

27 февраля 2010 г. в 06:34:13.0 произошло землетрясение на побережье Центрального Чили с магнитудой 8,7 на глубине 33 км, вызвавшее значительные разрушения в эпицентральной зоне. Эпицентр землетрясения с координатами 35°83' ю.ш. и 72°67' з.д. расположен в региональном поясе сейсмической активности и находится над зоной субдукции плиты Наска, уходящей под Южно-Американскую плиту.

Гидрогеологический отклик на землетрясение зафиксирован в скважине на территории ГФО «Михнево» в неотфильтрованном ряду прецизионных измерений вариаций уровня подземных вод (таблица, рис. 3, б). Значимые гармонические колебания уровня воды в скважине сопряжены со временем вступления поперечной (SS или SKKS) и поверхностной волны Релея (рис. 3, а). Отклик гидрогеологической системы «напорный водоносный горизонт – скважина» на прохождение остальных типов волн, представленных на сейсмограмме крупномасштабного сейсмического события, возможно, присутствует в вариациях уровня, но не зафиксирован в связи с меньшими значениями амплитуд смещения грунта, чем в указанных выше волнах.

В представленных рядах вариаций уровня подземных вод, предварительно отфильтрованных от влияния атмосферного давления, высокочастотной составляющей в диапазоне 5–200 сек, гидрогеологический отклик на землетрясение, произо-

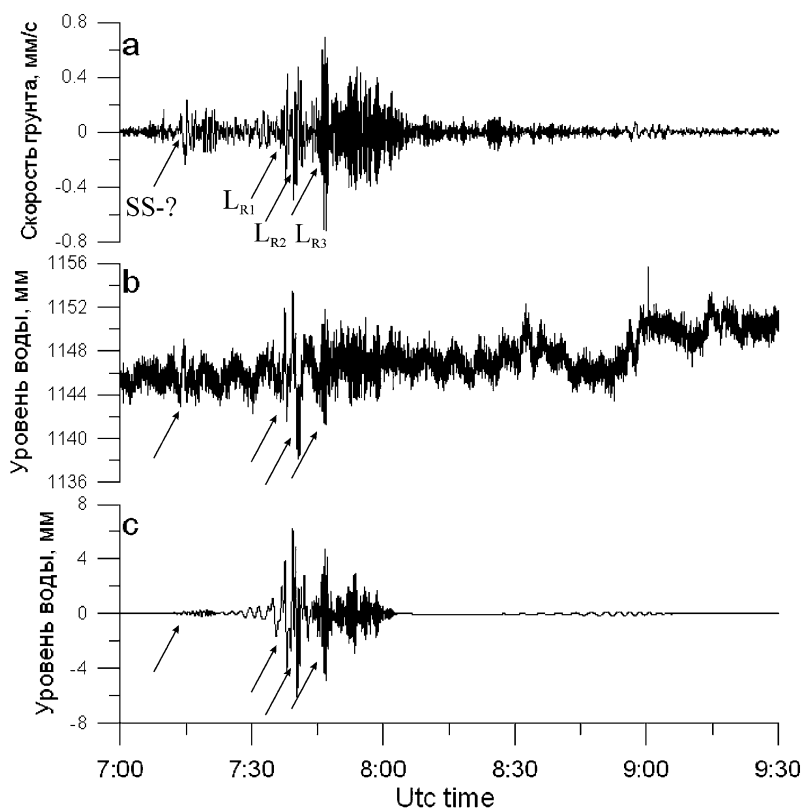


Рис. 3. Регистрация землетрясения от 27.02.2010 г., побережье Центрального Чили.
(a–b) – нефильтрованные данные: а – скорость смещения грунта по EW-компоненте, мм/с, b – уровень воды над датчиком, мм; (c) – уровень воды, отфильтрованный от давления, шума и в диапазоне 5–200 с, мм)

шедшее на побережье Центрального Чили, рассмотрен детально (рис. 3, c; 4, a, b). До прихода поперечной сейсмической волны фоновые вариации уровня подземных вод не превышали 3 мм. На представленных сейсмограммах вступление поперечной волны зарегистрировано через 39 минут после Чилийского землетрясения в 07:13:27.7 и наиболее четко выражено по субширотной компоненте. В уровне подземных вод при прохождении поперечной волны зафиксировано нарушение фонового ритма колебаний уровня. Прослежены вариации уровня воды в скважине – подъем с последующим восстановлением до первоначального положения, изменяющиеся в противофазе с субширотной сейсмической компонентой (рис. 4, a).

В поверхностной волне Релея, представленной на записи вертикальной компоненты, выделено 3 группы колебаний, различающихся по амплитуде и периодам (таблица). Время вступления каждой группы поверхностных волн соответствует синхронным вариациям уровня подземных вод, но различаются по выраженности экстремумов (рис. 4, b). Для поверхностных волн максимальное значение скорости вертикального смещения грунта (по Z-компоненте) наблюдается в третьей группе волн. Максимальная амплитуда изменения уровня подземных вод приурочена ко 2-ой группе волн и достигает 15,8 мм.

Землетрясение			Данные сейсмической регистрации				Гидрогеологический отклик	
Район	Дата Время	Глубина, км Магнитуда	Тип (группа) волны	Время прихода	Период, с	Скорость смещения грунта, мм/с	Период, с	Амплитуда, мм
Острова Рюкю, Япония	26.02.2010 20:31:23.8	15 7,2	L _R	~21:12	~20	~0,3	~20	0,13
Побережье Центрального Чили	27.02.2010 06:34:13.0	33 8,7	SS-?	07:13:27.7	43,8	0,46	43,8	5,0
			L _R	07:36:26.7	48,5	0,8	48,5	10,2
			L _R	07:39:00.6	43,1	0,98	43,1	15,8
			L _R	07:45:42.9	24,7	1,42	24,7	10,4
			?	~ 08:56		0,15		4,0

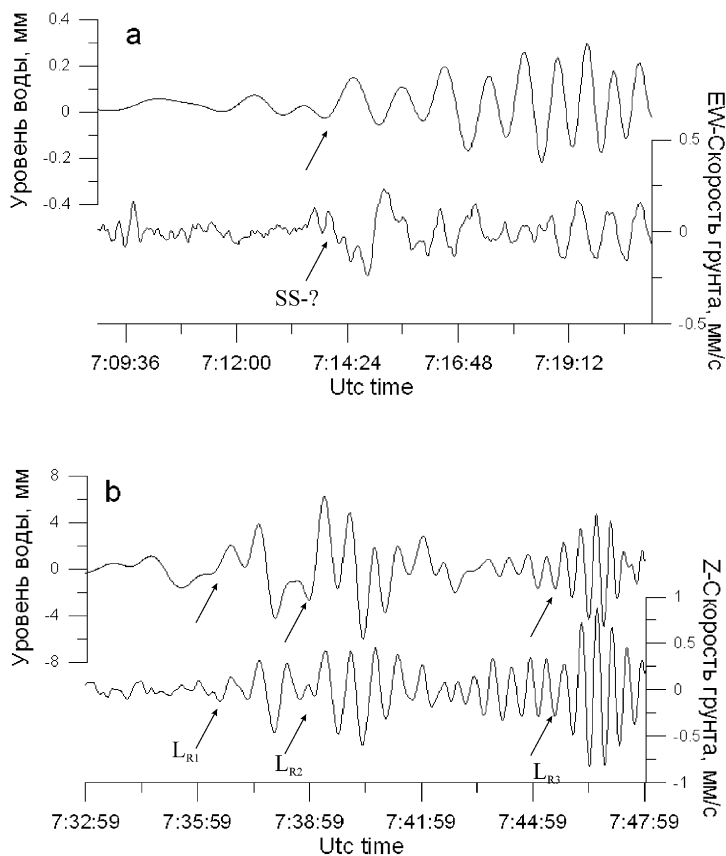


Рис. 4. Регистрация землетрясения от 27.02.2010 г., побережье Центрального Чили.
(а–б) – отфильтрованные данные от давления, шума и в диапазоне 5–200 с: а – отклик уровня на прохождение поперечной волны, EW-компонента, б – отклик уровня на прохождение поверхностных волн Релея, Z-компонента

Следует отметить, что при вступлении следующего цуга сейсмических волн через 2,5 часа после рассматриваемого землетрясения, в вариациях уровня подземных вод фиксируется «ступенчатый» подъем с амплитудой до 4 мм (рис. 3, б). Прослеженный остаточный эффект, предположительно, может быть обусловлен изменением естественной микротрещиноватости водовмещающих пород. Аналогичный «ступенчатый» подъем уровня выделен в результатах гидрогеологических исследований, проводимых за рубежом [Yang et al., 2005].

При обработке рядов прецизионных измерений прослежен также гидрогеологический отклик на землетрясение, произошедшее 26 февраля 2010 г. в районе островов Рюкю (таблица, рис. 5). Колебания уровня воды в скважине, вызванные поверхностными волнами, выделены в условиях стабилизации пьезометрической поверхности на фоне минимального влияния суточных и полусуточных гармоник приливообразующей составляющей. Абсолютные значения вариаций уровня находятся в пределах точности определения.

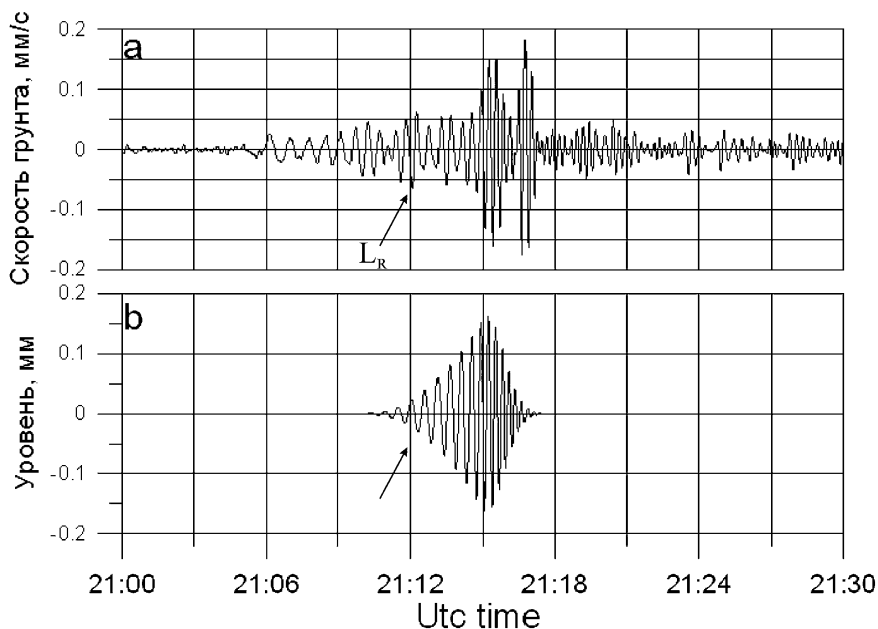


Рис. 5. Регистрация землетрясения от 26.02.2010 г., острова Рюкю, Япония
(а–б) – отфильтрованные данные от давления, шума и в диапазоне 5–200 с: а – скорость смещения грунта по Z-компоненте, мм/с, б – уровень подземных вод, мм

Таким образом, в представленных рядах уровня подземных вод выделен гидрогеологический отклик на землетрясения, вызванный прохождением поперечных и поверхностных волн Релея. Последующее расширение базы данных о реакции подземных вод на крупномасштабные события, в том числе и техногенной природы (взрывы на карьерах), могут быть использованы для изучения взаимосвязи между геофизическими и гидрогеологическими параметрами изучаемого массива горных пород.

Заключение

По данным стационарных наблюдений за уровнем напорного водоносного горизонта, проводимых на территории ГФО «Михнево» между отфильтрованными рядами приливообразующей составляющей и объемной деформацией водовмещающих пород прослежено расхождение, предположительно свидетельствующее о наличии дополнительного фактора, оказывающего влияние на режим подземных вод.

Амплитуды приливных волн в окрестностях полусуточных периодов стабильны относительно гармоник суточных приливов, изменяющихся в широких пределах. Максимально высокие значения отмечены в августе 2008 г., минимальные – в декабре 2008 г. Наиболее четкий гидрогеологический отклик прослежен в периоды стабилизации пьезометрической поверхности – апрель–май, сентябрь–октябрь 2008 г. и февраль–март 2009 г.,

Впервые в платформенных условиях в данных прецизионных измерений уровня подземных вод выделен гидрогеологический отклик на землетрясения с магнитудой свыше 7. Полученные данные сопоставлены с параметрами сейсмических волн, определенных сейсмологической сетью, расположенной на территории ГФО «Михнево». Комплексность и синхронность наблюдений за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород, характеризующихся высокой точностью измерений и частотой опроса, позволили выполнить детальный анализ реакции подземных вод на крупномасштабное сейсмическое событие.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-05-00917-а; 09-05-12023-офи-м).

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность д. ф.-м. н. В.М. Овчинникову за предоставленные данные сейсмической регистрации и обсуждение полученных результатов.

Литература

Кабыченко Н.В. Оценка фазового сдвига между приливной деформацией и вариациями уровня воды в скважине // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 62–72.

Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории геофизической обсерватории «Михнево» // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 52–62.

Yang Zhu-Zhuan, Deng Zhi-hui, Zhao Yun-xu, Zhu Pei-yao. Preliminary study on coseismic step-like changes of water-level in the Dazhai well, Simao city, Yunnan Province / Acta seismologica sinica. 2005. Vol. 18 No. 5. P. 611–617.

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