

## РЕАКЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГФО «МИХНЕВО»

*Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов, И.С. Свинцов*

В статье анализируется гидрогеологический отклик флюидонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн от землетрясений с магнитудой более 7. Объектом наблюдений является система «пласт – скважина». С июля 2013 г. по результатам прецизионного мониторинга на территории ГФО «Михнево» зарегистрированы динамические колебания уровня безнапорного водоносного горизонта от девяти землетрясений, включая и катастрофическое событие с магнитудой 8,3, произошедшее 16 сентября 2015 г. вблизи побережья Центрального Чили. Эти результаты дополнили мировую базу данных, в которой в области сейсмических скоростей 0,1–1 мм/с имеются лишь единичные результаты гидрогеологических измерений.

### Введение

В многочисленных публикациях последнего десятилетия преимущественно по результатам исследований, проведенных в сейсмоактивных регионах, выполнен анализ зарегистрированных вариаций уровня подземных вод [Wang, Chia, 2008; Kitagawa et al., 2011; Кочарян и др., 2010; 2011; Копылова и др.; 2012; Киссин, 2015]. Выделены четыре основных типа, к которым отнесены: гидрогеодинамический предвестник землетрясения, косейсмические изменения уровня воды в ближней зоне землетрясения, колебания уровня при воздействии сейсмических волн от землетрясений и взрывов и постсейсмические изменения уровня подземных вод.

По данным прецизионного мониторинга подземных вод на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») впервые в платформенных условиях зарегистрированы два последних типа вариаций уровня, которые свидетельствуют о влиянии проходящей сейсмической волны на напряженное состояние и характеристики коллектора. Прецизионный мониторинг режима подземных вод на территории ГФО «Михнево» организован в 2008 г. и с 2013 г. дополнен высокоточными наблюдениями за уровнем вышележающего безнапорного водоносного горизонта. В верхнем безнапорном водоносном горизонте наблюдались динамические колебания уровня, связанные с прохождением поперечных и поверх-

ностных сейсмических волн. В низезалегающем напорном водоносном горизонте наряду с динамическими вариациями зарегистрированы постсейсмические изменения уровня от катастрофических землетрясений, произошедших 27.02.2010 г. вблизи побережья Центрального Чили с магнитудой 8,7 и 11.03.2011 г. вблизи восточного побережья о. Хонсю (Япония) с магнитудой 8,8 [Виноградов и др., 2011]. При исследовании свойств флюидонасыщенного коллектора сейсмические волны могут использоваться в качестве зондирующего сигнала [Elkhoury et al., 2006].

В настоящей работе выполнен анализ гидрогеологических откликов безнапорного водоносного горизонта на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений. Подобных работ в платформенных условиях не проводилось, так как не было представительных рядов гидрогеологических наблюдений.

### **Методика измерений и обработки данных**

Наблюдательные скважины ГФО «Михнево», вскрывающие разновозрастные водоносные горизонты, оборудованы прецизионными датчиками уровня LMP308i производства фирмы BD Sensors (Германия) с частотой опроса 1 Гц и точностью 0,1 мм. Регистрация сейсмических волн в натуральных условиях выполняется широкополосным датчиком STS-2, установленным на глубине 20 м в шахте. С цифровой метеостанции с частотой опроса 1 Гц поступают данные по изменению атмосферного давления с точностью 0,1 гПа.

Ранее при обработке прецизионных гидрогеологических рядов, полученных на территории ГФО «Михнево», основное внимание уделялось выделению приливных волн и их сопоставлению с теоретически рассчитанными и экспериментально выделенными приливными компонентами из сейсмических данных. На основе полученных значений выполнялся анализ временных изменений значений фазового сдвига и оценка проницаемости водовмещающих пород [Беседина и др., 2014; 2015]. Первичная обработка данных заключалась в выборке и систематизации гидрогеологических, сейсмических и барометрических записей в интервалах, соответствующих времени прохождения волн от удаленных землетрясений с магнитудой более 7. В группах поверхностных волн, выделенных в сейсмограммах скорости смещения грунта и уровня, определялись значения максимальной амплитуды (измеренные между последовательным максимумом и минимумом) и основной период колебаний. Эти характеристики использовались при сравнении гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн.

### **Характеристика объекта исследований**

На территории ГФО «Михнево» повсеместно развит безнапорный каширский водоносный горизонт, залегающий первым от поверхности. Водовмещающими породами в интервале 44–56 м являются известняки неравномерно трещиноватые кавернозные с подчиненными прослоями глин. По данным геофизических исследований, проведенных в скважине, основной водоприток прослежен в интервале 48–49 м.

Режим каширского водоносного горизонта равнинного типа с мая 2014 г. – техногенно-нарушенный. В естественных условиях амплитуда сезонных вариаций уровня достигает 1,5 м, в техногенно-нарушенных условиях – не превышает 0,5 м (рис. 1). Горизонт характеризуется относительно высоким коэффициентом бароме-

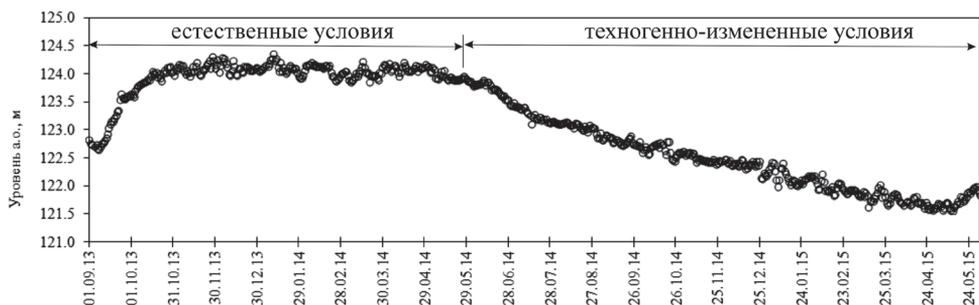


Рис. 1. Изменение уровня каширского водоносного горизонта

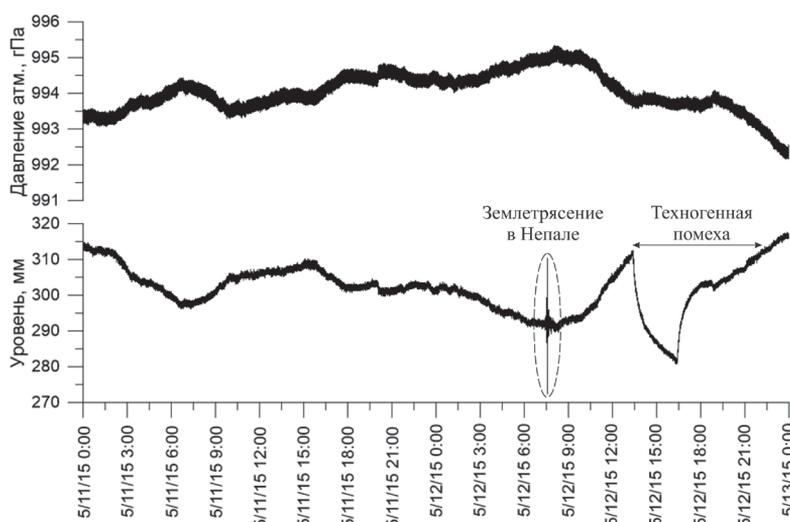


Рис. 2. Прецизионные изменения уровня каширского горизонта и атмосферного давления

трической эффективности – свыше 0,6 для периодов более 10 часов. Уровень меняется в противофазе с вариациями атмосферного давления (рис. 2). В высокочастотном диапазоне коэффициент барометрической эффективности уменьшается до 0,3. Влияние земных приливов на вариации уровня безнапорного горизонта слабо выражено: по результатам спектрального анализа прослежено усиление сигнала только в диапазоне суточных приливных волн. Режим подземных вод подвержен техногенному влиянию. Региональный тренд снижения уровня с мая 2014 г. (рис. 1) связан с интенсивной эксплуатацией каширского водоносного горизонта многочисленными скважинами, колодцами на территории Московской области. Эпизодическое формирование воронок депрессии через 3–5 суток в наблюдательной скважине обусловлено водоотбором из технической скважины, удаленной на расстояние 300 м (рис. 2) [Vinogradov et al., 2015].

На фоне природных (атмосферного давления) и техногенных факторов в зарегистрированных рядах данных выделяются вариации уровня подземных вод, обусловленные прохождением сейсмических волн. На рис. 2 видно, что амплитуда гидро-

геологического отклика на землетрясение, произошедшее в Непале с магнитудой 7,5, сопоставима по амплитуде с техногенным снижением уровня, связанным с эпизодическим водоотбором и барометрическим воздействием на водоносный горизонт.

### Полученные результаты

С июля 2013 г., согласно каталогу Геофизической службы РАН (ГС РАН), зарегистрировано 19 землетрясений с магнитудой  $M_s$  более 7. Для 9 землетрясений из этой выборки наблюдались гидрогеологические отклики безнапорного водоносного горизонта на территории ГФО «Михнево» (Таблица). В Таблице указаны параметры землетрясений, взятые из каталога ГС РАН ([www.ceme.gsras.ru](http://www.ceme.gsras.ru)) (время в очаге, глубина, магнитуда) и рассчитанные эпицентральное расстояние и энергетическая плотность по (2). Дополнительно для группы поверхностных волн, выделенных как в сейсмических записях, так и в данных уровня, определены основной период и двойная амплитуда.

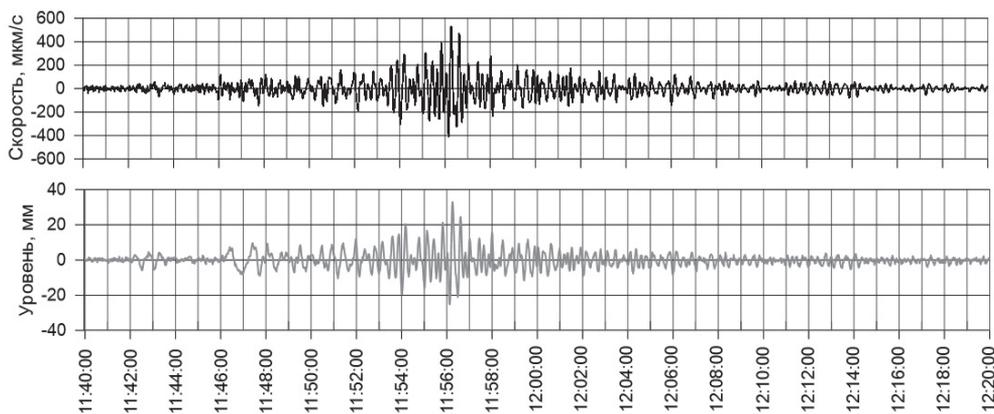
Таблица

Район (приуроченность очага)	Дата Время в очаге, GMT	Глубина, км	Магнитуда $M_s$	Расстояние, км	Группа поверхностных волн			
					Сейсмические		Гидрогеологические	
					Основной период, с	Скорость грунта, мкм/с	Основной период, с	Амплитуда, мм
Землетрясения Трансазиатского сейсмического пояса								
Пакистан	<u>24.09.2013</u> 11:29:47	20	7.7	3830	14.4	940	14.4	58.1
Непал	<u>25.04.2015</u> 06:11:24	13	7.9	4778	19.2	460	20.4	36.3
	<u>26.04.2015</u> 07:09:06	10	7.0	4892	16.8	160	18.0	10.3
	<u>12.05.2015</u> 07:05:17	15	7.5	4896	16.8	635	15.6	38.0
Землетрясения Тихоокеанского сейсмического пояса								
Rat Islands. Алеуты	<u>23.06.2014</u> 20:53:07	100	7.3	7607	54.0	396	60.0	16.7
Побережье Северного Чили	<u>01.04.2014</u> 23:46:46	20	8.0	12968	18.0	400	18.0	15.2
	<u>03.04.2014</u> 02:43:13	20	7.6	13016	24.0	307	24.0	13.8
Соломоновы острова	<u>12.04.2014</u> 20:14:34	10	7.7	13189	19.2	382	26.4	9.0
Центральное Чили	<u>16.09.2015</u> 22:54:32	25	8.3	15508	20.4	413	12-22	25.0

В вариациях уровня воды при прохождении волн от землетрясений в районе Соломоновых островов (13.04.2014 г. с магнитудой 7,4) и вблизи острова Бонин, Япония (30.05.2015 г. с магнитудой 7,8 при глубине очага 680 км) видны поперечные волны с амплитудами сигнала, сопоставимыми с уровнем шума. Эти землетрясения характеризуются наименьшими из зарегистрированных значениями скорости смещения грунта 135–140 мкм/с. Гидрогеологический отклик на более слабое динамическое воздействие нами не обнаружен. Среди зарегистрированных гидрогеологических откликов безнапорного водоносного горизонта наибольшие значения амплитуд вариаций уровня до 36,3–58,1 мм соответствуют землетрясениям, приуроченным к Трансазиатскому сейсмическому поясу.

Для землетрясения, произошедшего в Пакистане 24.09.2013 г., реакция безнапорного водоносного горизонта на вступление первого цуга поперечных и поверхностных волн отличается большим периодом колебаний по сравнению со скоростью смещения грунта (рис. 3). Последующие динамические вариации уровня и скорости смещения грунта в диапазоне поверхностных волн синхронны. Гидрогеологические отклики на три землетрясения, произошедшие в Непале в течение 18 суток, подобны друг другу и синфазны сейсмической волне. Различия по значениям двойной амплитуды и периоду вариаций в смещении грунта и уровне безнапорного горизонта обусловлены параметрами очага сейсмического события (табл. 1). Наибольшие значения амплитуд сейсмического и гидрогеологического сигналов наблюдались для землетрясения М 7,5 (12.05.2015), а максимальные значения периода колебаний зарегистрированы для события М 7,9 (25.04.2015).

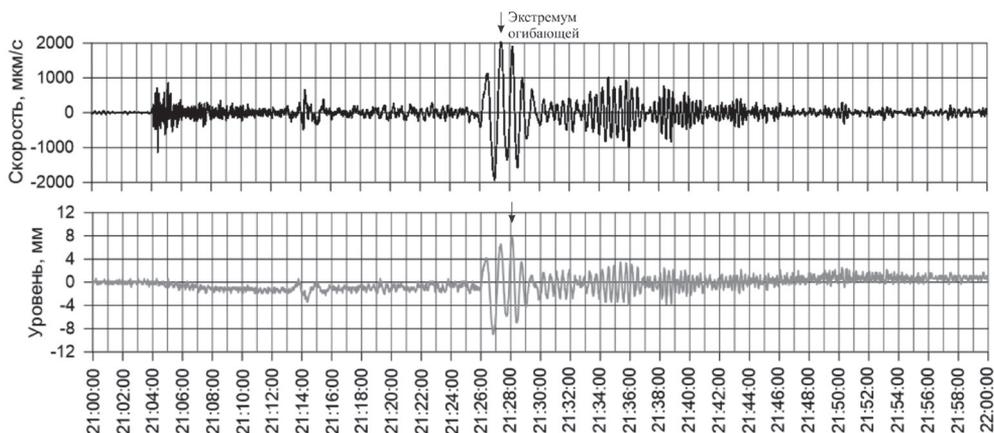
Амплитуды гидрогеологических откликов на пять землетрясений в Тихоокеанском сейсмическом поясе не превышают 25 мм. Большим периодом колебаний уровня воды относительно смещения грунта характеризуется вступление поперечных волн от Алеутского землетрясения и вступление серии поверхностных волн от землетрясения, произошедшего в районе Соломоновых островов. Вариации уровня воды, связанные с землетрясениями, произошедшими вблизи побережья Северного Чили, синхронны с зависимостью скорости смещения грунта от времени. В гидрогеологическом отклике на недавнее землетрясение, произошедшее в Центральном Чили (16.09.2015 г.), прослеживается вступление отраженных поперечных и



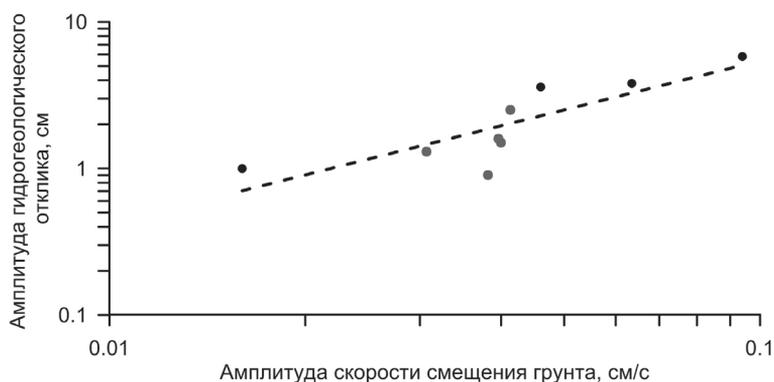
**Рис. 3.** Гидрогеологический отклик на прохождение сейсмических волн от землетрясения в Пакистане 24.09.2013 г. с магнитудой 7,7

поверхностных волн. При обработке гидрогеологических данных выполнен сравнительный анализ всех огибающих вариаций уровня, связанных с прохождением сейсмических волн от 9 землетрясений. Однако задержка экстремумов огибающих вариаций уровня относительно экстремумов огибающих скорости смещения отмечена только для двух землетрясений, произошедших в районе Rat Islands (Алеуты) (рис. 4) и Соломоновых островов.

Зависимость динамических колебаний уровня воды в скважине от амплитуды скорости смещения грунта аппроксимируется функцией  $dh = 70,5 \cdot V_m^{1,11}$  (рис. 5), тогда как для постсейсмических изменений уровня получено соотношение  $dh = \alpha \cdot V_m^{0,5}$ ,  $\alpha \sim 2-10$  [Кочарян и др., 2011]. Анализируемые параметры от 9 землетрясений про-



**Рис. 4.** Гидрогеологический отклик на прохождение сейсмических волн от землетрясения в районе Крысыих островов, Алеуты 23.06.2014 г. с магнитудой 7,3



**Рис. 5.** Зависимость между максимальной амплитудой скорости смещения грунта и гидрогеологического отклика при прохождении сейсмической волны от землетрясений Трансзиатского (черные кружки) и Тихоокеанского пояса (серые кружки).

Пунктиром показана корреляционная функция  $dh = 70,5 \cdot V_m^{1,11}$  с коэффициентом детерминации  $R = 0,69$

ходят по верхней границе постдинамических изменений уровня для диапазона скоростей смещения грунта 0,1–1 мм/с [Кочарян и др., 2011].

### Заключение

По результатам прецизионного мониторинга уровня за период наблюдений с июля 2013 по сентябрь 2015 гг. на территории ГФО «Михнево» в безнапорном водоносном горизонте выделены гидрогеологические отклики на 9 землетрясениях с магнитудой более 7.

Определены некоторые закономерности реакции подземных вод на удаленные сейсмические события, а именно:

– в исследуемом водоносном горизонте вариации уровня не регистрируются при скорости смещения грунта в группе поверхностных волн менее 140 мкм/с;

– зависимость динамических колебаний уровня воды в скважине от амплитуды скорости смещения грунта аппроксимируется функцией, близкой к линейной, что не противоречит опубликованным данным;

– эти результаты дополнили мировую базу данных, в которой в области сейсмических скоростей 0,1–1 мм/с имеются лишь единичные результаты гидрогеологических измерений;

– отмечены расхождение периодов колебаний уровня воды относительно смещения грунта при вступлении поперечных и поверхностных волн и задержка экстремумов огибающих вариаций уровня относительно экстремумов огибающих скорости смещения, которые могут быть использованы при оценке проницаемости флюидонасыщенного коллектора.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00719).*

### Литература

*Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С.* Исследование фазового сдвига между приливными компонентами в смещении грунта и уровне подземных вод по данным ГФО «Михнево» // *Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. Вып. 5. М.: ГЕОС. 2014. С. 96–104.*

*Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С., Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В.* Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Часть 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод // *Физика Земли. 2015. № 1. С. 73–82.*

*Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Свинцов И.С.* Реакция подземных вод на удаленные сейсмические события // *Всероссийская конференция с международным участием «Проблемы сейсмотектоники». Воронеж: Научная книга. 2011. С. 153–157.*

*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.* Гидрогеосейсмические 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., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М.* Изменение флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием сейсмических колебаний. Часть 1. Анализ результатов наблюдений // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 70–79.

*Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М.* Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. № 12. 2011. С. 50–62.

*Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C.* Seismic waves increase permeability // Letters. 2006. V. 441. P. 1135–1138. (Supplementary Material for Nature manuscript 2005-11-13339 Seismic Waves Increase Permeability), doi:10.1038/nature04798.

*Kitagawa Y., Itaba S., Matsumoto N., 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 Letters. Volume 116. B08301, doi: 10.1029/2010JB007794. 2011.

*Vinogradov E.A., Besedina A.N., Gorbunova E.M., Svintsov I.S.* Precision monitoring of underground water conditions disturbed by technogenic cause // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, www.sgem.org, SGEM2015 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-32-2 / ISSN 1314-2704, June 18–24, 2015, Albena Co, Bulgaria. Book 1. Vol. 2. PP. 563-570.

*Wang C.-Y., Chia Y.* Mechanism of water level changes during earthquakes: Near field versus intermediate field // Geophysical Research Letters. Volume 35. L12402, doi: 10.1029/2008GL034227. 2008.