

Э.М. Горбунова, Е.А. Виноградов, А.Н. Беседина, Д.В. Гашев  
**РЕАКЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И  
КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВЗРЫВЫ**

Горбунова Элла Михайловна - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИДГ РАН, e-mail: emgorbunova@bk.ru

Виноградов Евгений Александрович - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИДГ РАН

Беседина Алина Николаевна - кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИДГ РАН

Гашев Дмитрий Владимирович - аспирант ИДГ РАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт динамики геосфер Российской академии наук, 119334, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, Россия

В статье проведен сравнительный анализ гидрогеологических эффектов, зарегистрированных от землетрясений и крупномасштабных взрывов. Рассмотрена реакция подземных вод на землетрясения Wenchuan 12.05.2008 г. М7.9, Lushan 20.04.2013 г. М6.6, группу землетрясений, произошедших в префектуре Gifu, Центральная Япония с 1990 г. по 1997 г. с магнитудами от 5.1 до 5.3, а также на Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г. М7.8, Олюторское 20.04.2006 г. М7.6 и землетрясение Petrolia 01.09.1994 г. М7.2. Выполнен анализ отклика уровня подземных вод в ближней зоне землетрясения в окрестности Chi-Chi 20.09.1999 г. М7.5. На ряде объектов Семипалатинского полигона исследована гидрогеодинамическая обстановка при проведении крупномасштабных взрывов с 1983 г. по 1989 г. Дополнительно привлечены опубликованные сведения по гидрогеологическому отклику на сверхмощные взрывы Cannikin 06.11.1971 г. и Mirlow 02.10.1969 г. в наблюдательных скважинах на острове Амчитка, Аляска. За основной параметр для сравнения реакции подземных вод на эндогенное и экзогенное воздействие на массив горных пород выбрана скорость смещения грунта. Установлено подобие косейсмических и постсейсмических гидрогеологических эффектов от землетрясений и взрывов в относительно однородных массивах, которые по разному проявляются в зонах влияния разломов разного ранга. Отмеченная степенная зависимость между скоростью смещения грунта и амплитудой снижения уровня подземных вод косвенно подтверждает основные закономерности реакции подземных вод на необратимые изменения водовмещающих пород *in situ*. Полученные результаты могут быть использованы для определения объема наведенной трещиноватости по имеющимся данным регистрации снижения уровня подземных вод, вызванных взрывами, а также при исследовании процессов, происходящих в ближней зоне землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, крупномасштабные взрывы, подземные воды, косейсмические эффекты, постсейсмические эффекты, гидрогеологические условия

Ye.M. Gorbunova, E.A. Vinogradov, A.N. Besedina  
**UNDERGROUND WATER RESPONSE TO EARTHQUAKES  
AND LARGE-SCALE EXPLOSIONS**

Gorbunova Jella Mihajlovna - candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, IDG RAS, e-mail: emgorbunova@bk.ru

Vinogradov Evgenij Aleksandrovich - candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, IDG RAS

Besedina Alina Nikolaevna - candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, IDG RAS

Institute of geosphere dynamics, 119334, Leninskij prospekt, 38, building 1, Moscow, Russia

We compared hydrogeological responses to earthquakes and large-scale explosions. We studied effects due to Wenchuan 12.05.2008 earthquake, M7.9, Lushan 20.04.2013 earthquake, M6.6, set of Gifu (Japan) 1990-1997 earthquakes, M5.1-5.3, Kronotsky 05.12.1997 earthquake, M7.8, Olyutorsky 20.04.2006 earthquake, M7.6, Petrolia 01.09.1994, M7.2. Apparently we considered underground water response to Chi-Chi 20.09.1999 earthquake, M7.5, that was registered in the near field. We discovered large-scale explosions impact at Semipalatinsk testing area in 1983-1989 and additionally considered data of Cannikin 06.11.1971 and Mirlow 02.10.1969 high-power explosions at Amchitka Island (Alaska). We take peak ground velocity (PGV) as a main parameter to compare underground water response to anthropogenic and natural impact. Hydrogeological effects are different at the areas of faults of different rank and in the solid rocks while peak ground velocity exceeds 40 cm/s. PGV and underground water level decline seem to be fitted by the power law that argues for similarity of hydrogeological response to irreversible rock changes. These results are believed to be useful for induced fracturing volume estimation by underground water variations data as well as other processes in the near field of earthquakes.

Keywords: earthquakes, large-scale explosions, underground water, co-seismic effects, post-seismic effects, hydrogeological conditions

### Введение

Подземные воды, заключенные в коллекторах различного типа, являются своеобразным индикатором состояния водовмещающих пород. В естественных условиях порупругий отклик массива на стационарные длиннопериодные вариации атмосферного давления, земные приливы и эпизодические высокочастотные колебания, связанные с прохождением сейсмических волн от землетрясений, приводит к соответствующим вариациям уровня водоносных горизонтов. Результаты мониторинга гидрогеологических откликов на экзогенные и эндогенные факторы широко используются для оценки основных фильтрационных параметров пласта [1-4].

Особый интерес представляет исследование реакции подземных вод на землетрясения в разных регионах мира [5-9]. Гипоцентр сейсмических событий обычно располагается на глубинах более 10 км вне зон активного и замедленного водообмена. Тем не менее, данные мониторинга уровня разновозрастных водоносных горизонтов, вскрытых преимущественно в интервалах первых сотен метров, реже – первых километров, свидетельствуют о разнообразных изменениях гидрогеологических условий на расстояниях от первых десятков километров до сотен и тысяч километров.

Впервые гидрогеологические эффекты с амплитудами от первых десятков сантиметров до 4.6 м были зарегистрированы от землетрясения, произошедшего 27 марта 1964 г. на Аляске с магнитудой 8.4. В одной из наблюдательных скважин, расположенных вблизи г. Пери, Флорида, получена одна из первых записей динамических вариаций уровня подземных вод, вызванных этим телесейсмическим событием [10].

Последующие многолетние наблюдения за реакцией подземных вод на землетрясения позволили выделить основные типы гидрогеологических эффектов: косейсмические и постсейсмические. Косейсмические вариации уровня, связанные с моментом прохождения сейсмических волн, различаются по реакции на события – скачкообразные и постепенные, по знаку – подъем или снижение и по наличию или отсутствию осцилляции уровня [11].

Проявление постсейсмических эффектов может быть связано:

- с формированием магистрального разрыва, сопровождаемого системой опережающих трещин, и сопряженного с очагом землетрясения;
- необратимыми деформациями в дискретной блоково-иерархической среде, контролируемые полем напряжений;
- локальными изменениями уровня после прохождения сейсмических волн.

Области проявления гидрогеологических эффектов зависят от параметров и механизма очага землетрясения, эпицентрального расстояния и напряженно-деформированного состояния среды [12]. Среди постсейсмических изменений уровня выделяются устойчивые (постоянные, незатухающие) продолжительностью от нескольких недель до нескольких месяцев [5, 8] и кратковременные вариации длительностью менее одной недели [13].

Существенно различаются механизмы изменения уровня воды в скважинах, действующие в ближней (на расстояниях не более 3 размеров очага [14]) и дальней зонах землетрясений. Так в ближней зоне вариации уровня водоносных горизонтов обычно сопоставляются с расчетными моделями распределения напряжений в очаговой зоне землетрясений, но сходимость теоретических и экспериментальных данных относительно невысока. В ряде работ указано, что подобное расхождение может быть обусловлено локальными гидрогеологическими условиями [11, 15]. Из-за невозможности прогноза пространственно-временного расположения очага землетрясения имеются лишь единичные данные регистрации гидрогеологических эффектов в ближней эпицентральной зоне. Например, при землетрясении Chi-Chi, Центральный Тайвань, произошедшим 21.09.1999 г., минимальное расстояние, при котором получены данные об изменении уровня, составило 14 км [16].

Четкого представления механизмов изменений гидрогеологических откликов в дальней зоне землетрясений пока тоже нет [6]. Различными авторами выдвинуты гипотезы, привлекающие такие явления как стресс-коррозия [17], дилатансия, вызванная вибрацией [18], декольматация микротрещин, вызванная вибрацией [14, 19].

Для понимания основных закономерностей изменения гидрогеодинамической обстановки, преимущественно, в ближней зоне землетрясений могут быть привлечены экспериментальные гидрогеологические данные, полученные при проведении крупномасштабных экспериментов, так как реакция подземных вод на взрывы и землетрясения подобна. Среди техногенных гидрогеологических эффектов выделяются также косейсмические вариации уровня подземных вод, связанные с прохождением сейсмических волн и постсейсмические, обусловленные необратимыми изменениями напряженно-деформированного состояния пород в ближней зоне.

Информация о гидрогеологических эффектах, вызванных проведением крупномасштабных взрывов на испытательных полигонах мира, ограничена. Первые сведения о подъеме уровня на 17 м относительно статического (первоначального положения) были получены через 40 дней после взрыва Aardvark, Невада 12.05.1962 г. в наблюдательной скважине, пройденной на расстоянии 307 м от эпицентра [20]. На площадке «Сары-Узень» Семипалатинского полигона через два месяца после подземного взрыва 14.10.1965 г. в скважине 1003 [21] по наблюдательным скважинам, расположенным на расстоянии от 200 до 700 м от эпицентра, установлено снижение уровня на 0.7 – 1.3 м и формирование депрессионной воронки [22]. При взрыве Mirlow 02.10.1969 г. на острове Амчитка, Аляска в наблюдательных скважинах, удаленных от эпицентра на расстояния от 8.7 до 22.7 км, зарегистрированы динамические вариации уровня с амплитудами от 17 до 72 см [23]. Для ближней эпицентральной зоны крупномасштабных взрывов определены основные этапы формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод [24].

Основная цель настоящей работы выделение общих закономерностей изменений гидрогеодинамической обстановки при крупномасштабном воздействии на массив, связанном с землетрясениями и проведением взрывов.

#### **Методический подход**

Для сравнения гидрогеологических эффектов от землетрясений и крупномасштабных взрывов были использованы опубликованные данные по сейсмоактивным регионам и имеющиеся экспериментальные материалы по Семипалатинскому полигону. Произведена выборка основных параметров сейсмических

событий и амплитуд снижения уровня подземных вод, зарегистрированных в пределах одного и того же региона. Основной акцент сделан на анализ геолого-структурных условий и наличие систем разрывных нарушений в ближней зоне.

На территории Семипалатинского полигона наблюдательные скважины глубиной от 100 до 200 м расположены в ближней зоне в радиусе от 0.3 до 3 км от эпицентра взрыва [25]. Вскрытые водоносные горизонты напорные и приурочены к зонам экзогенного выветривания коренных пород и к тектонически ослабленным. При крупномасштабных экспериментах регистрация изменения уровня выполнялась преимущественно в ручном режиме с использованием электроуровнемеров ЭУ-25 - ЭУ-100. Точность регистрации вариаций уровня не превышала  $\pm 1$  см. Определить динамические воздействия на тот момент не представлялось возможным. Замеры уровней проводились не ранее первых часов после взрыва, поэтому выделить косейсмические гидрогеологические эффекты не представляется возможным.

Основным параметром для сопоставления выбрана скорость смещения грунта, рассчитанная по одной и той же методике для землетрясений и крупномасштабных взрывов с учетом основных параметров событий – мощности, глубины и эпицентрального расстояния. Так для событий с  $M > 4$  максимальная скорость смещения грунта ( $V_m$ ) от землетрясений различной магнитуды и эпицентрального расстоянием ( $R$ ) справедлива зависимость  $V_m = 0.0012 \frac{10^M}{R^{1.5}}$ , где  $V_m$  выражается в см/с, а расстояние  $R$  в км [14].

#### Результаты исследований

Ретроспективный анализ многолетних экспериментальных данных, полученных на Семипалатинском полигоне [24, 25], позволил выделить основные стадии изменения гидрогеодинамической обстановки при крупномасштабном воздействии:

- формирование купола избыточного давления в момент взрыва;
- скачкообразное или постепенное снижение уровня до первоначального положения и ниже в зависимости от объема наведенной трещиноватости и наличия гидравлической связи с техногенно ослабленными зонами, сопряженными с гипоцентром взрыва;
- установление квазистационарного течения подземных вод и последующее восстановление уровня до статического (первоначального) положения.

Продолжительность каждой из выделенных стадий зависит от параметров взрыва, геолого-структурных и гидрогеологических условий участков исследований.

Основные закономерности формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод представлены на рисунке 1 на примере результатов мониторинга уровня в трех наблюдательных скважинах глубиной от 101 до 143 м. Скважины 52 и 84 пробурены на эпицентральных расстояниях 0.4 км и 1.2 км через 5 месяцев и 2 месяца после проведения крупномасштабных экспериментов. Скважина 36 была пройдена в пределах массива горных пород, ненарушенного взрывным воздействием, на расстоянии 11 км от эпицентра проектируемого взрыва.

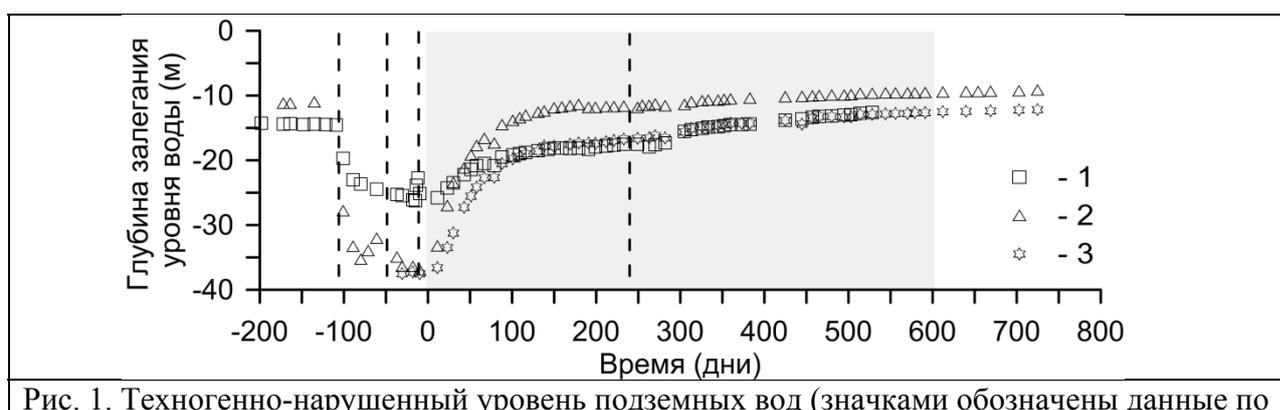


Рис. 1. Техногенно-нарушенный уровень подземных вод (значками обозначены данные по

скважинам: 1 – 52, 2 – 36, 3 – 84; пунктиром обозначены дни проведения взрывов, которые оказали влияние на уровень; фрагмент данных, выделенных серой заливкой, представлен на рисунке 2)

За рассматриваемый период наблюдений на технической площадке было проведено 7 испытаний с магнитудой 5.0-6.1 [26] на расстояниях от 0.9 до 21 км от наблюдательных скважин. Четыре из отмеченных взрывов оказали влияние на уровень подземных вод: первый взрыв привел к региональному снижению уровня поверхности от 12 до 24 м, последующие три взрыва осложнили процесс восстановления уровня.

Последствия техногенного воздействия крупномасштабных экспериментов на состояние водовмещающей среды сопоставлены с реакцией подземных вод на одно из самых больших сейсмических событий, произошедших в Китае за последние 50 лет, - Wenchuan 12.05.2008 г. с магнитудой 7.9. В рамках эксперимента по исследованию разломной зоны Longmen Shan, сопряженной с очагом, был пробурен ряд скважин [8]. В одной из них - WSFD-1, пройденной на глубину 1.2 км на расстоянии 39 км от эпицентра землетрясения, выполнялись прецизионные измерения уровня подземных вод для оценки проницаемости разломной зоны. За период наблюдений с 1.01.2010 г. по 6.08.2011 г. уровень подземных вод поднялся на 16 м над датчиком. На протяжении инструментальных измерений уровня произошло 6 землетрясений с магнитудами от 6.8 до 9.1, которые повлияли на проницаемость разломной зоны.

На диаграмме 2 эти данные сопоставлены в едином масштабе с результатами экспериментальных наблюдений за восстановлением уровня в трех наблюдательных скважинах после крупномасштабного взрыва на одном из участков Семипалатинского полигона.

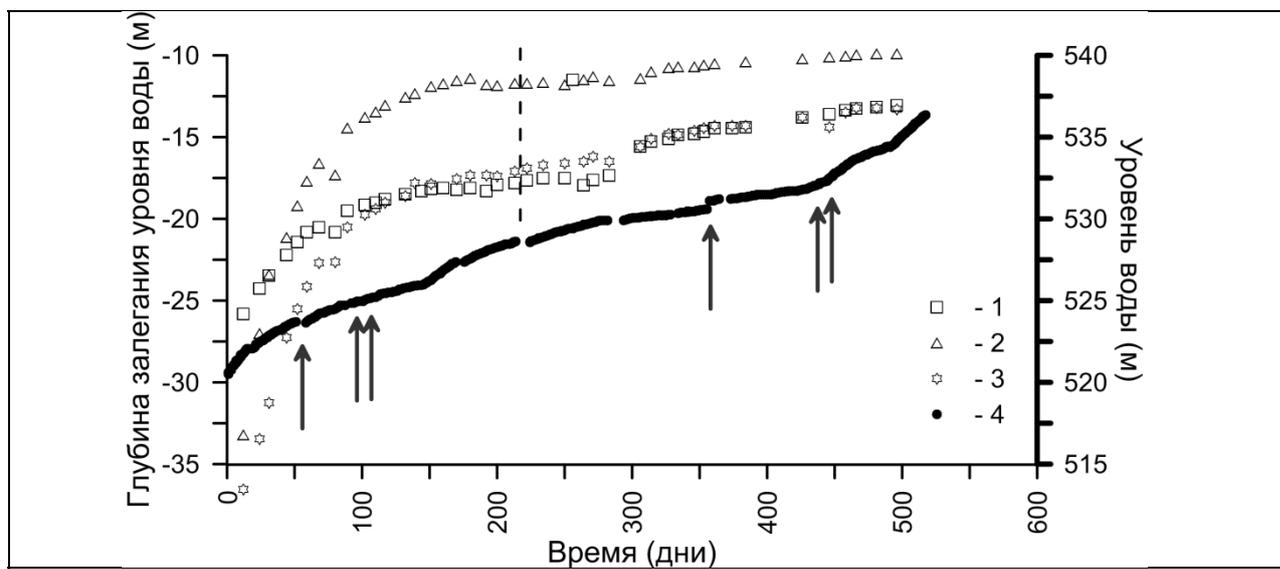


Рис. 2. Графики восстановления уровня в наблюдательных скважинах (значками обозначены данные по скважинам: 1 – 52, 2 – 36, 3 – 84; 4 – WSFD-1 [8]; пунктиром показаны дни проведения взрывов, которые оказали влияние на уровень; стрелками – дни землетрясений [8])

Подобие восстановления уровней подземных вод по отобранным скважинам, расположенным в различных геолого-структурных и гидрогеологических условиях, испытавших различное воздействие, может косвенно указывать на общие закономерности изменения гидрогеодинамической обстановки при взрывах и землетрясениях, реализуемые в ближней зоне.

На рис. 3 сопоставлены данные наблюдений за вариациями уровня подземных вод, зарегистрированными при землетрясении, произошедшем в префектуре Gifu, Центральная

Япония 16.03.1997 с магнитудой 5.8 [15], с результатами измерений, полученными в наблюдательных скважинах на одном из объектов Семипалатинского полигона.

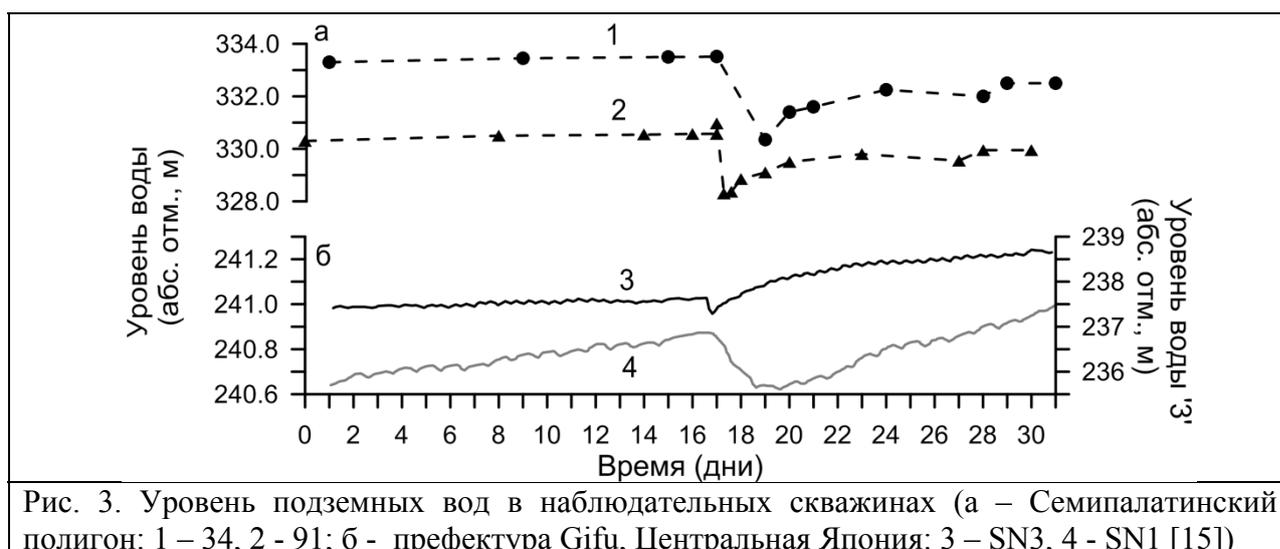


Рис. 3. Уровень подземных вод в наблюдательных скважинах (а – Семипалатинский полигон: 1 – 34, 2 - 91; б - префектура Gifu, Центральная Япония: 3 – SN3, 4 - SN1 [15])

Скважины SN-1 и SN-3 (Gifu) глубиной 91.2 м и 130.8 м, соответственно, вскрывают высоконапорные водоносные горизонты. Величина напора изменяется от 55 м до 70 м. В наблюдательных скважинах, удаленных от эпицентра землетрясения на расстояния 58 км и 59 км, зарегистрированы постсейсмические снижения уровня с амплитудами до 28-29 см на протяжении 3 часов и 3 дней с последующим восстановлением уровня через день и 8 дней.

В скважинах 34 и 91 (Семипалатинский полигон, Казахстан) глубиной 111 м и 112 м значения напора составляют 41.6 м и 27.1 м, соответственно. Снижение уровня на эпицентральной расстоянии 0.9 км через сутки после взрыва достигло 3.2 м, на расстоянии 1.5 км через 2 часа после взрыва - 2.3 м. В обоих случаях наблюдается кратковременное снижение и последующее восстановление уровня. Зарегистрированные непродолжительные вариации уровня указывают на локальные необратимые изменения состояния водовмещающих пород, вероятно, приуроченные к литолого-стратиграфическим границам раздела разновозрастных отложений.

На рис. 4 и в таблице 1 приведены параметры землетрясений и сведения по зарегистрированным косейсмическим и постсейсмическим снижениям уровня для ряда землетрясений и взрывов, проведенным на острове Амчитка, Аляска (рис. 4).

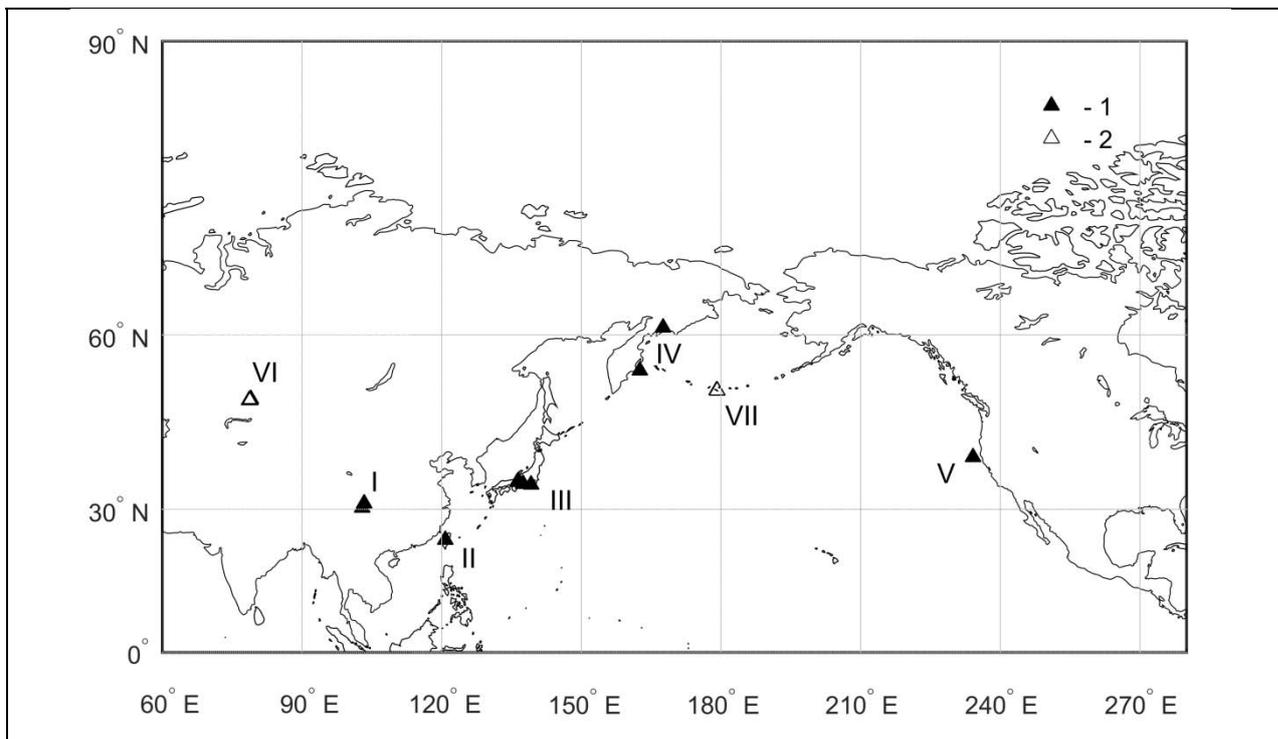


Рис. 4. Карта расположения очагов землетрясений и крупномасштабных взрывов на полигонах (1 – землетрясения: I – Wenchuan, Lushan [27], II – Chi-Chi [16], III – Gifu [15], IV – Кроноцкое, Олюторское [5], V – Petrolia [19]; 2 - взрывы: VI – Семипалатинский полигон, VII – остров Амчитка, Аляска [23, 28])

Основные приведены в таблице 1.

№ пп	Дата	Место	Магнитуда (мощность взрыва, кТ)	Глубина, км	Расстояние, км	Скорость смещения грунта, см/с	Наблюдательная скважина			
							№	Глубина, м	Снижение	
									Амплитуда, см	Тип
<b>Землетрясения</b>										
I	12.05.2008	Wenchuan	7.9		157	48	4	4076	918	косейсмика
					267	22	6	101	110	постсейсмика
					272	21	7	251	92	косейсмика
					284	20	8	300	68	постсейсмика
					328	16	9	105	95	косейсмика
	20.04.2013	Lushan	6.6		267	1.1	6	101	75.2	постсейсмика
II	20.09.1999	Chi-Chi	7.5	8	16	593	JS1		690	косейсмика
					20	220	SH1		37	косейсмика
					14	724	JS2	186	1109	косейсмика
					40	150	GK		74	косейсмика
					20	425	LIYU		594	косейсмика
III	20.02.1990	Gifu	6.5		195	1.39	SN-3	131	28	косейсмика
	30.07.1992		5.3		68	0.43	SN-3		42	косейсмика
	28.05.1994		5.2		86	0.42	SN-3		30	постсейсмика
	16.03.1997		5.8		58	1.71	SN-3		29	косейсмика
IV	05.12.1997	Кроноцкое	7.8	25	320	13.2	ЮЗ-5	800	100	постсейсмика
	20.04.2006	Олюторское	7.6	45	748	2.3	1309	750	7	постсейсмика
V	01.09.1994	Petrolia	7.2		301	3.64	-	91	17	постсейсмика
<b>Взрывы</b>										

VII	06.11.1971	Cannikin	5000	1.8	6420	0.7	Long Shot 9-blue	152	210	постсейсмика
	02.10.1969	Mirlow	1000	1.2	8700	0.18	UAe-1	2134	42.1	косейсмика
					16000	0.06	UAe-6h	2133	23.5	косейсмика
					22700	0.04	UAe-1	1233	16.7	косейсмика

### Обсуждение результатов

На основе проведенного обзора опубликованных данных по реакции подземных вод на землетрясения и взрывы и экспериментальных данных по ряду объектов Семипалатинского полигона построен сводный график (рис. 5). Ранее в статье [14] преимущественно по гидрогеологическому эффекту подъема уровня подземных вод в пределах одних и тех же объектов от разных сейсмических событий было установлено, что величина постсейсмического изменения уровня пропорциональна корню квадратному из максимального значения скорости смещения грунта.

В данной статье рассматривается максимальное снижение уровня, которое проявляется как в момент сейсмического события – косейсмический эффект, так и после – постсейсмический. Продолжительность последнего может изменяться от первых десятков минут в дальней зоне до нескольких месяцев в ближней, и косвенно свидетельствует о типе деформирования массива – упругой и/или необратимой реакции.

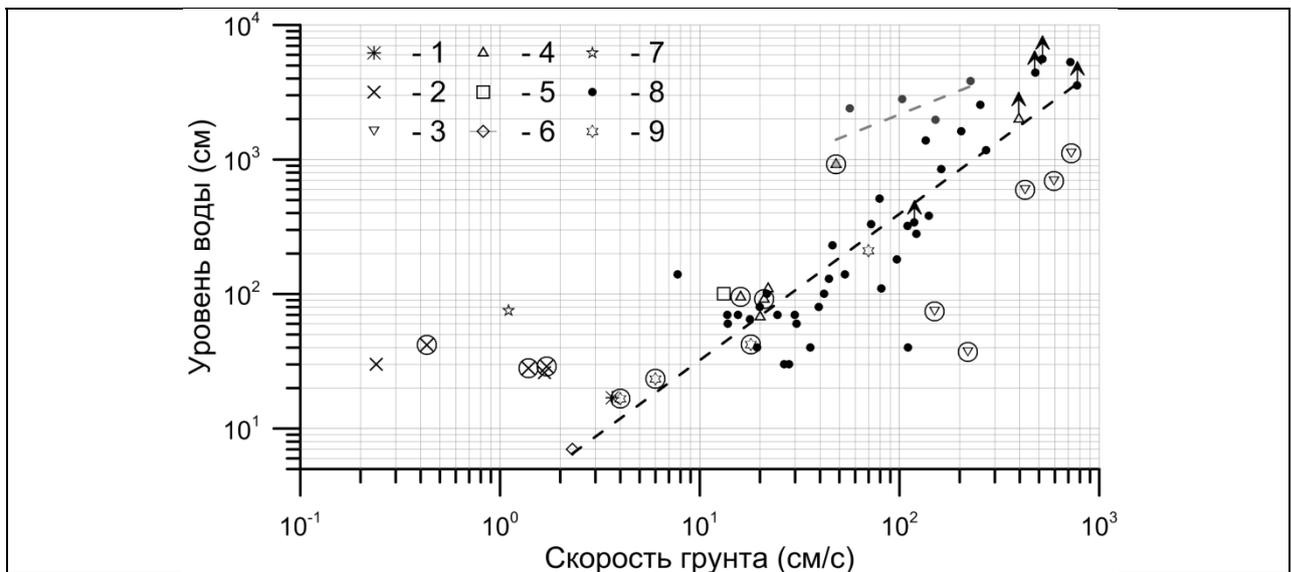


Рис. 5. Максимальные снижения уровня подземных вод, зарегистрированные при землетрясениях и взрывах. Землетрясения: 1 - Petrolia [19], 2 - Gifu [15], 3 - Chi-Chi [16], 4 - Wenchuan [27], 5 - Кроноцкое [5], 6 - Олюторское [5], 7 - Lushan [27]. Взрывы: 8 - Семипалатинский полигон, 9 - остров Амчитка, Аляска [23, 28]. Кружками выделены значения косейсмических снижений уровня, стрелками показаны данные, которые имеют большие значения, но не определены). Черная пунктирная линия - степенная функция  $Y = 2.6X^{1.09}$ , серая пунктирная линия - функция  $Y = 143.9X^{0.59}$

Мгновенное снижение уровня поверхности подземных вод ниже статического уровня может быть вызвано необратимым увеличением трещинной пустотности и установлением гидравлической связи с зонами наведенной трещиноватости. Замедленное снижение уровня обусловлено как невысокими фильтрационными параметрами горизонта, так и уплотнением массива.

В интервале скоростей 0.2-1.7 см/с в двух наблюдательных скважинах в префектуре Gifu, центральная Япония, удаленных на расстояние 350-415 м севернее субширотного слабопроницаемого разлома Tsukiyoshi, зарегистрированы

гидрогеологические отклики на 4 землетрясения [15]. Косейсмические и постсейсмические отклики сопоставимы и составляют 0.3-0.4 м несмотря на то, что эпицентры очагов землетрясений расположены в разных зонах и скорости смещения грунта изменяются в широких пределах (значки (2) на рис. 5). Вероятно, это связано с тем, что полигон расположен в зоне техногенного дренирования подземных вод из-за необходимости осушения горной выработки Топо. При малых скоростях смещения грунта от землетрясений локальные гидрогеологические условия определяют амплитуду снижения уровня.

При скоростях более 2 см/с выдерживается линейная зависимость между скоростью смещения грунта и гидрогеологическим откликом на события различного типа – землетрясения и взрывы. В целом при увеличении скорости смещения грунта от 2.3 см/с до 22 см/с амплитуда снижения уровня при различных землетрясениях – Олюторском, Petrolia, Кроноцком и Wenchuan (значки (6), (1), (5), (4) на рис. 5) закономерно возрастает от 7 см до 110 см.

Для гидрогеологических эффектов, связанных со взрывами, проведенными на острове Амчитка, Аляска (значки (9) на рис. 5) и Семипалатинском полигоне (значки (8) на рис. 5) прослеженная закономерность сохраняется. При близких значениях скоростей смещения грунта 3.6-4.0 см/с реакция подземных вод на землетрясение Petrolia и взрыв Mirlow одинакова. В диапазоне скоростей смещения грунта 16 см/с до 100 см/с реакция подземных вод на взрывы Mirlow и Cannikin согласуется с многочисленными экспериментальными данными, зарегистрированными на объектах Семипалатинского полигона в ближней зоне (рис. 5).

При скоростях смещений грунта 13.2-22.0 см/с снижение уровня при Кроноцком землетрясении и землетрясении Wenchuan в пределах разлома Huayingshan, расположенного на расстоянии 300 км юго-восточнее разломной зоны Longmenshan, составило 100-110 см и сопоставимо с гидрогеологическим откликом на взрывы, зарегистрированным в наблюдательных скважинах Семипалатинского полигона. Через 5 лет после землетрясения Wenchuan максимальное снижение уровня в пределах разлома Huayingshan при землетрясении Lushan 20.04.2013 г. М6.6 составило 0.7 м при скорости смещения грунта 1.1 см/с (значки (7) на рис.5).

Косейсмическое снижение уровня в основной разломной зоне Longmenshan от землетрясения Wenchuan при скорости смещения грунта 48 см/с составило 9.2 м и сопоставимо с реакцией подземных вод, распространенных в зоне влияния регионального Калба-Чингизского разлома, установленной в четырех наблюдательных скважинах от двух взрывов, проведенных на Семипалатинском полигоне (серые значки (8) на рис.5). Калба-Чингизский разлом является границей раздела между каледонидами и герцинидами. В осевой части разлома распространены малые интрузии гранодиоритов. Постсейсмический эффект снижения уровня от 23.9 м до 38.2 м, связанный с региональным снижением уровня подземных вод, проявился с запаздыванием после проведения испытаний при скоростях смещений грунта от 56 см/с до 227 см/с.

При скоростях смещения грунта более 400 м/с снижение уровня на территории Семипалатинского полигона составляет более 40 м. Максимальное снижение уровня достоверно не определено по ряду причин, в том числе и в связи с полным осушением ствола скважины в ближней зоне. Для скважины, расположенной в зоне влияния гидрогеологически активного разлома снижение уровня составило 53.1 м при скорости смещения грунта 432 см/с (табл. 1, рис. 5).

В то же время при землетрясении Chi-Chi, произошедшего на расстоянии 10 км к востоку от субмеридионального разлома Chelungpu, косейсмическое снижение уровня в наблюдательных скважинах, вскрывающих аллювиальные неконсолидированные отложения, не превысило 11.1 м при тех же скоростях смещения грунта от 150 до 724 см/с [16].

Для сопоставления гидрогеологических эффектов, зарегистрированных в зонах влияния региональных разломов и в массиве горных пород от землетрясений и крупномасштабных взрывов, оценена регрессионная функция. Реакция подземных вод  $dh$  на эндогенное и экзогенное воздействия описывается степенной функцией  $dh = 2.6V_m^{1.09}$  (коэффициент детерминации  $R = 0.85$ ), в зонах региональных разломов степенная функция составляет  $dh = 143.9V_m^{0.52}$  (коэффициент детерминации  $R = 0.52$ ), где  $V_m$  - максимальная скорость смещения грунта. При подъеме уровня в наблюдательных скважинах от взрывов получена зависимость  $dh = 31.94V_m^{0.56}$  (коэффициент детерминации  $R = 0.46$ ) [14]. При прецизионном мониторинге режима подземных вод в платформенных условиях на территории геофизической обсерватории «Михнево» зависимость динамических колебаний уровня от удаленных землетрясений аппроксимируется функцией  $dh = 70.5V_m^{1.11}$  (коэффициент детерминации  $R = 0.69$ ) [29].

### Заключение

Согласно схематизации изменений гидрогеодинамической обстановки при взрыве одна из последних стадий формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод представляет наибольший интерес. Скачкообразное и/или постепенное региональное снижение уровня подземных вод соответствует необратимым изменениям напряженно-деформированного состояния массива. В данной статье основное внимание уделено сопоставлению амплитуд снижений уровня подземных вод, зарегистрированных при землетрясениях и взрывах.

За основной параметр для сравнения реакции подземных вод на эндогенное и экзогенное воздействие на массив горных пород выбрана скорость смещения грунта. В области относительно невысоких значений до 40 см/с максимальные амплитуды гидрогеологического отклика не превышают 100 см и соответствуют формированию зон наведенной трещиноватости или подновления существующей вдоль структурных границ, литолого-стратиграфических контактов.

Гидрогеологические эффекты от взрывов и землетрясений по разному проявляются в зонах влияния разломов различного ранга и относительно однородных массивов при скоростях смещения грунта свыше 40 см/с. Выдерживается степенная зависимость между скоростью смещения грунта и амплитудой снижения уровня подземных вод, которая косвенно подтверждает основные закономерности реакции подземных вод на необратимые изменения водовмещающих пород *in situ*.

Полученные результаты предварительной обработки экспериментальных данных по регистрации гидрогеологических откликов на крупномасштабные взрывы могут быть использованы для решения обратной задачи - определения объема наведенной трещиноватости по имеющимся данным регистрации необратимых изменений уровня подземных вод, вызванных взрывами. Подобная оценка объема наведенной трещиноватости и выделение гидрогеологически активного разлома ранее выполнена для одного из крупномасштабных взрывов [30]. Предложенный методический подход может быть апробирован применительно к анализу последствий от землетрясений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук (проект № 0146-2015-0012).*

### Литература

1. Hsieh P. A., Bredehoeft J. D., Farr J. M. Determination of aquifer transmissivity from Earth tide analysis // Water Resour. Res. 1987. Vol. 23, no 10. pp. 1824-1832.
2. Cutillo P. A., Bredehoeft J. D. Estimating Aquifer Properties from the Water Level Response to Earth Tides // Ground Water. 2011. Vol. 49, no. 2. pp. 600-610.
3. Burbey T. J., Hisz D., Murdoch L. C., Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects // J. Hydrol. 2012. Vol. 414-415, no 11. pp. 317-328.

4. *Lai G., Ge H., Wang W.* Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. Vol. 118, pp. 1904-1924, doi:10/1002/jgrb.50165.
5. Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. - Петропавловск-Камчатский: Холд. Комп. «Новая книга», 2012. - 480 с.
6. *Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I.* Chilen Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform // *Pure Appl. Geophys.* 2016. Vol. 173, no 2. pp. 321-730.
7. *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 // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, no B08301. pp. 1-12, doi:10.1029/2010JB007794/
8. *Xue L., Li H.-B., Brodsky E. E., Xu Z.-Q., Kano Y., Wang H., Mori J. J., Si J.-L., Pei J.-L., Zhang W., Yang G., Sun Z.-M., Huang Y.* Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone // *Science*. 2013. Vol. 340, pp. 1555-1559.
9. *Wang C.-Y., Manga M.* Earthquakes and Water. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 228 p.
10. *Cooper H. H., Bredehoeft J. D., Papadopoulos I. S., Bennett R. R.* The response of well-aquifer systems to seismic waves // *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70, no 16. pp. 3915-3926.
11. *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. Planet. Sci. Let.* 2015. Vol. 430, pp. 66-74.
12. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. - М.: Наука, 2015. 328 с.
13. *Yan R., Woith H., Wang R.* Groundwater level changes induced by the Tohoku earthquake in Cnine mainland // *Geophys. J. Int.* 2014. Vol. 199, pp. 533-548. Doi: 10/1093/gji/ggu196.
14. *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*. - 2011. - № 12. - С. 50-62.
15. *King C.-Y., Azuma S., Igarashi G., Ohno M., Saito H., Wakita H.* Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, no B6. pp. 13073-13082.
16. *Chia Y.-P., Wang Y.-S., Huang C.-C., Chen J.-S., Wu H.-P.* Coseismic changes of groundwater level in response to the 1999 Chi-Chi earthquake // *Western Pacific Earth Sci.* 2002. Vol. 2, no 3. pp. 261-272.
17. *Kanamori H., Brodsky E.* The physics of earthquakes // *Rep. Prog. Phys.* 2004. Vol. 67, pp. 1429–1496.
18. *Bower, D. R., Heaton K. C.,* Response of an aquifer near Ottawa to tidal forcing and the Alaskan earthquake of 1964 // *Can. J. Earth Sci.* 1978. Vol. 15, pp. 331–340.
19. *Brodsky E. E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.* A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no B8. pp. 2390-3003. Doi: 10.1029/2002JB002321.
20. *Knox B. J., Rawson D. E., Korver J. A.* Analysis of a Groundwater Anomaly Created by an Underground Nuclear Explosion // *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70, no 4. pp. 823-835.
21. Ядерные испытания СССР: Современное радиоэкологическое состояние полигонов. - М.: Изд. АТ, 2002. - 639 с.
22. *Израэль Ю. А., Петров В. Н., Прессман А. Я., Ровинский Ф. Я., Стукин Е. Д., Тер-Сааков А. А.* Радиоактивное загрязнение подземных сред при подземных ядерных взрывах и методы прогнозирования. - Л.: Гидромет, 1970. - 68 с.
23. *Balance W. C., Dudley W. W.* Hydrologic effects of the MILROW event, in Geologic and hydrologic effects of the MILROW event, Amchitka, Aleutian Islands, Alaska // *U.S. Geol. Surv. Rept.* 1971. USGS-474-32, pp. 51-65.

24. Адушкин В. В., Спивак А. А., Горбунова Э. М., Ферапонтова Е. Н. Гидрогеологические эффекты подземных ядерных взрывов // ДАН. - 1993. - Т. 332. - № 3. - С. 372-374.
25. Горбунова Э. М. Мониторинг режима подземных вод на участках проведения крупномасштабных экспериментов // Вестник НЯЦ РК. - 2015. - Вып. 4. - С. 71-78.
26. Ан В. А., Годунова Л. Д., Каазик П. Б. Линейный тренд пробега продольной сейсмической волны // Вестник НЯЦ РК. - 2014. - Вып. 2. - С. 81-94.
27. Shi Z., Wang G., Wang C.-Y., Manga M., Liu C. Comparison of hydrogeological responses to the Wenchuan and Lushan earthquakes // Earth. Planet. Sci. Lett. 2014. Vol. 391, pp. 193-200.
28. Gonzales D. D., Wollitz L. E. Hydrogeological effects of the Cannikin event // Bull. Seism. Soc. Am. 1972. Vol. 62, no 6. pp. 1527-1542.
29. 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": сб. науч. ст. Динамические процессы в геосферах. Вып. 7. - М.: ГЕОС, 2015. - С. 76-85.
30. Расторгуев И. А., Горбунова Э. М. Определение трещиноватости водоносного горизонта в зоне подземного ядерного взрыва // XI международный экологический симпозиум "Урал атомный, Урал промышленный". Екатеринбург, 2005. - С. 106-108.