

## Научные статьи

УДК 550.3:556.3

### СЕЙСМИЧНОСТЬ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

©2006 Г.Н. Копылова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: gala@emsd.iks.ru*

На основе обобщения результатов специализированных гидрогеологических наблюдений в сейсмоактивных районах мира (Япония, США, Армения, Камчатка) рассматриваются механизмы сейсмического влияния на режим подземных вод. Выделены характерные типы изменений в режиме подземных вод под влиянием сейсмичности с учетом механизмов сейсмического влияния, видов режимных объектов (источники и самоизливающиеся скважины, пьезометрические скважины) и различия процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций в напорных водоносных системах, содержащих пресные воды без газа и газонасыщенные подземные воды.

#### ВВЕДЕНИЕ

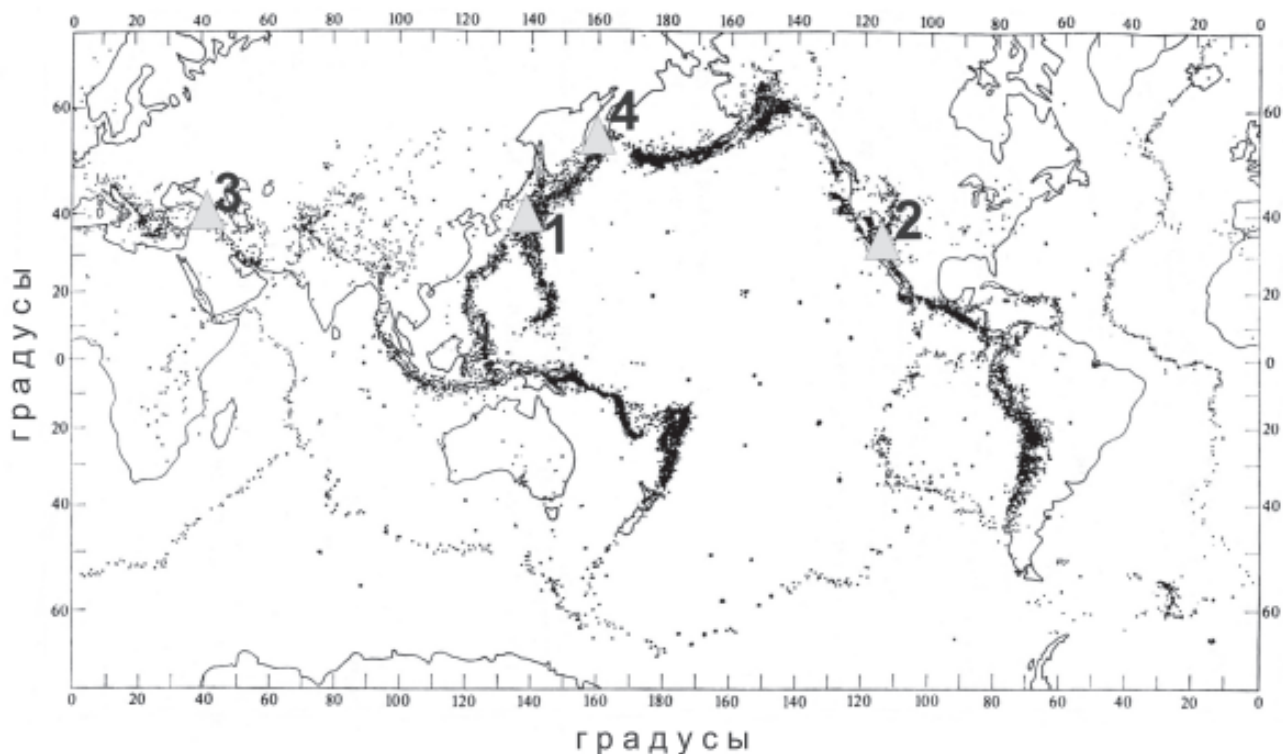
Исследование сейсмического воздействия на режим подземных вод представляет актуальное направление в науках о Земле. Подземные воды являются ценным полезным ископаемым и широко используются в сейсмоактивных районах мира для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в бальнеологии, для теплоснабжения и выработки электроэнергии. Поэтому расширение знаний о влиянии сейсмичности на формирование ресурсов и качества подземных вод представляет фундаментальную и прикладную задачу гидрогеологии. Во-вторых, без углубленного изучения влияния сейсмичности на режим подземных вод невозможно решить задачу использования гидрогеологических предвестников в целях прогноза землетрясений (Киссин, 1982, 1994; Пиннекер и др., 1982). Ключевую роль в решении указанных задач имеют данные многолетних специализированных наблюдений на источниках, пьезометрических и самоизливающихся скважинах в сейсмоактивных районах. Понятие «специализированные наблюдения» включает: 1- непрерывность и известную точность регистрации параметров режима подземных вод; 2 - применение методов обработки временных рядов данных наблюдений, направленных на учет и компенсацию факторов-помех — атмосферного

давления, земных приливов, атмосферных осадков, процессов водного питания и техногенного воздействия; 3 - анализ воздействия землетрясений на изменения регистрируемых параметров.

В настоящем сообщении рассматриваются два вопроса: 1 - механизмы влияния сейсмичности на формирование режима напорных пресных и газонасыщенных термоминеральных подземных вод и 2- различные типы изменений в режиме подземных вод с учетом механизмов влияния сейсмичности, гидрогеологических условий и видов режимных водопроявлений.

В работе используются опубликованные данные многолетних специализированных наблюдений на скважинах и источниках в сейсмоактивных районах Камчатки (Гриц, 1986; Копылова, 1992, 2001, 2005; Копылова и др., 1994, 2004, 2005; Хаткевич, Рябинин, 1998, 2004), Японии (Igarashi, Wakita, 1991; King et al., 1999, 2000; Kitagawa, Matsumoto, 1996; Kitagawa, Koizumi, 2000; Tsunogai, Wakita, 1995; Wakita, 1975, 1981), США (Roeloffs, 1998) и Армении (Wang et al., 2004) (рис. 1). Данные режимных наблюдений на скважинах и источниках Камчатки получены Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН (с 1 апреля 2005 г. Камчатский филиал Геофизической службы РАН).

В методическом плане мы руководствуемся следующими положениями.



**Рис. 1.** Схема сейсмичности Земли (точки – эпицентры землетрясений) и расположение полигонов проведения специализированных гидрогеологических наблюдений: 1- Япония, 2 – Калифорния, США; 3 – Армения, 4 – Камчатка (табл. 1).

1. Сейсмичность, как совокупность отдельных землетрясений и процессов их подготовки, представляет геодинамический фактор формирования режима подземных вод и воздействует на подземные воды за счет изменения напряженно-деформированного состояния водонасыщенных горных пород (Гриц, 1986; Киссин, 1982, 1993; Ковалевский, 1973; Основы..., 1983).

2. Влияние сейсмичности на режим подземных вод проявляется в гидрогеосейсмических эффектах или в гидрогеосейсмических вариациях, представляющих характерные (повторяющиеся, присущие данному водопроявлению) изменения гидрогеодинамических, гидрогеохимических и гидрогеотермических параметров режима скважин и источников. В зависимости от интенсивности сейсмического воздействия, характеризующегося соотношением величин магнитуды землетрясения и его гипоцентрального расстояния, гидрогеосейсмические вариации могут состоять из нескольких частей - предшествующей землетрясению и ко- и/или постсейсмической, либо из одной части - ко- и/или постсейсмической, или не проявляться вовсе (Копылова, 1992). Гидрогеосейсмические вариации являются основными источниками информации о процессах в подземных водах, вызванных сейсмичностью.

### МЕХАНИЗМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РЕЖИМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Собственно землетрясение представляет образование разрыва в напряженной среде, при котором происходит излучение упругих сейсмических волн и перераспределение статического напряженного состояния среды в окрестностях очага землетрясения. Под очагом землетрясения понимается область сейсмического разрыва и излучения сейсмических волн (Гольдин, 2005).

Поэтому землетрясение может воздействовать на подземные воды двумя способами: 1 - статическим способом за счет изменения статического напряженного состояния напорных водоносных систем (водонасыщенных резервуаров) и 2 - динамическим способом за счет изменения напряженно-деформированного состояния насыщенных горных пород при прохождении сейсмических волн. В результате этих воздействий могут формироваться косейсмические и постсейсмические вариации в изменениях режима источников и скважин. Под «водоносной системой источника или скважины» понимается объективное единство конечного объема насыщенных горных пород и процессов, обеспечивающих

величину напора и водную разгрузку, специфические особенности химического состава, температуры разгружаемой подземной воды и их изменения (Копылова, Воропаев, 2005).

Косейсмические вариации проявляются в изменениях гидрогеодинамических параметров – уровней воды и порового давления, непосредственно в момент образования разрыва и излучения сейсмических волн. Их формирование связано с изменениями порового (флюидного) давления.

Постсейсмические вариации наиболее интенсивно проявляются после момента землетрясения и обусловлены, в основном, динамическим воздействием сейсмических волн на водоносные системы источников и скважин. В их формировании важную роль играют, наряду с изменениями флюидного давления, вариации проницаемости насыщенных пород за счет деформирования структуры порово-трещинного пространства и фазовых изменений в составе порового флюида, а также процессы течения подземных вод, изменение фильтрационных связей и условий взаимодействия подземных вод в различных частях водоносных систем.

Теоретические модели процессов подготовки землетрясений развиваются и совершенствуются с 70-х годов XX в. В основе моделей дилатансии-диффузии и лавинно-неустойчивого трещинообразования лежат представления о стадийном характере изменения скорости деформации и прочности среды в окрестности очага землетрясения за счет самоорганизации трещинообразования в горных породах при росте тектонических напряжений. Эти модели демонстрируют, что в процессе подготовки землетрясения возможны стадии резкого изменения скорости деформации среды и возникновения разнообразных предвестников, в том числе и гидрогеологических (Соболев, 1993).

В консолидационной модели И.П. Добровольского предполагается, что на некоторой стадии роста тектонических напряжений возникают условия консолидации мелких блоков среды в достаточно большом объеме, окружающем область будущего очага. Кроме этого, в фазе начавшегося разрушения выделяются две стадии:  $\alpha$ -стадия, которая предшествует образованию магистрального разрыва и включает форшоки и криповые подвижки в области очага, и  $\beta$ -стадия, которая включает образование магистрального разрыва и афтершоковый процесс. Разнообразные предвестники могут возникать в фазе консолидации на всей площади консолидированного блока. Они будут иметь относительно долгосрочный характер. На  $\alpha$ -стадии фазы разрушения предвестники могут иметь более краткосрочный характер (Добровольский, 1984).

В модели С.В. Гольдина (Гольдин, 2004, 2005) синтезированы основные закономерности формирования состояния предразрушения различных материалов, а также данные о проявлении сейсмологических, деформационных и других видов предвестников землетрясений. В этой модели показано, что возникновению землетрясений длительное время предшествуют геомеханические процессы в окрестностях будущего очага, включающие развитие трещинообразования в горных породах, изменение реологии и перемещение блоков среды в большом масштабе их иерархии. При этом избыточная концентрация механических напряжений в очаговой области приводит к развитию различных аккомодационных процессов, определяющих специфическую пространственно-временную мезоструктуру очаговой области. Под очаговой областью (очаговой зоной) понимается область проявления различных предвестников, которая характеризуется аномальными напряжениями или другими аномальными характеристиками среды и может иметь размеры на порядок больше области очага землетрясения (Гольдин, 2005). В качестве главных типов аккомодационных процессов выделяются: 1 - перераспределение напряжений в очаговой области по механизму трещинной дилатансии; 2 - образование зон квазипластического течения, характеризующихся усиленной диссипацией энергии; 3 - упрочнение блочной структуры геоматериала в отдельных зонах путем ужесточения контактов смежных блоков. В типичном случае каждому типу аккомодационного процесса соответствуют подобласти очаговой зоны, в которых он наиболее интенсивно проявляется. Землетрясение, как правило, возникает, на границах подобластей с разной реологией, обусловленных контрастностью физических свойств горных пород и особенностями развития определенного типа аккомодационного процесса (Гольдин, 2005).

Модель С.В. Гольдина показывает наиболее вероятный сценарий подготовки сильного землетрясения в земной коре и верхней мантии через развитие аккомодационных процессов в напряженном, флюидонасыщенном и неоднородном геоматериале, имеющем иерархическую блоковую структуру. Именно такое представление в наибольшей степени соответствует условиям реальной геологической среды в сейсмоактивных регионах.

Гидрогеологические предвестники, как аномальные изменения в режиме подземной гидросферы, могут проявляться на различных этапах формирования мезоструктуры очаговой области, с момента образования концентраторов избыточных напряжений. В качестве таких концентраторов могут выступать различные процессы –

твердотельный фазовый переход в глубоких частях зон Беньофа, магматические очаги как источники термонапряжений; области метаморфизма и дегидратации с изменяющимся объемом; медленные перемещения масс земной коры. Для очаговых областей в земной коре и верхней мантии основным механизмом образования концентраторов сейсмотектонических напряжений является замедление относительного перемещения литосферных плит из-за образования механических препятствий. Ими могут быть жесткие неровности поверхности скольжения (*asperities*), наличие более жестких участков, где скорость крипа уменьшается; появление жестких блоков на пути текущего материала. Контролирующим параметром развития очаговой области землетрясения являются скорость деформации и изменение свойств геоматериала, в первую очередь, его прочности (Гольдин, 2005).

Наиболее вероятными моментами проявления гидрогеологических предвестников могут быть начальный или экстремальный этап диффузии напряжений от концентратора в окружающее пространство очаговой области, а также различные этапы формирования мезоструктуры очаговой области.

Диффузия напряжений от концентратора сопровождается развитием приповерхностной области трещинной дилатансии, которая по своим латеральным линейным размерам может значительно превышать область очага землетрясения (Алексеев, Белоносов, Петренко, 2001; Гольдин, 2004). Развитие дилатансии сопровождается деформацией и расширением насыщенных горных пород вследствие увеличения объема трещинно-порового пространства. По оценкам (Гольдин, 2004, 2005) для всего объема дилатирующей толщи упругие деформации не превышают  $10^{-6}$ - $10^{-5}$ , при этом увеличение пористости может достигать  $n \times 10^{-4}$ . Степень выраженности гидрогеологических предвестников и особенности их проявления зависят от скорости деформации, определяющей степень изменения проницаемости насыщенных горных пород, а также от конкретных гидрогеологических условий в точках наблюдений. Именно гидрогеологические условия определяют механизмы формирования гидрогеологических предвестников и особенности их проявления в режиме подземных вод (Киссин, 1994). В качестве таких механизмов выступают вариации порового давления, изменение фильтрационных связей между различными фрагментами водоносных систем источников и скважин, изменение условий смешивания различающихся по химическому и газовому составу подземных вод. Очевидно и то, что общими свойствами гидрогеологических предвестников будет их проявление в режиме напорных

подземных вод в пределах всей дилатирующей области и зависимость их развития от скорости деформирования водонасыщенных пород.

Формирование мезоструктуры очаговой области сильного землетрясения может сопровождаться возникновением участков квазипластической деформации с проявлением различных типов неустойчивостей - криповых подвижек, медленных землетрясений, а также развитием участков упрочнения геоматериала с преобладанием хрупкого разрушения (форшоковая активизация) (Гольдин, 2005). Эти процессы также могут вызывать изменения напряженно-деформированного состояния насыщенных горных пород и соответствующие отклики в режиме подземной гидросферы.

Из всех возможных видов гидрогеосейсмических вариаций, предсейсмические аномалии или гидрогеологические предвестники землетрясений представляются наиболее привлекательными для их исследования. Проявление гидрогеологических предвестников тесно связано с развитием сейсмотектонических процессов в пределах сейсмоактивного региона и отражает развитие мезоструктуры очаговых областей сильных землетрясений.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ

В табл. 1 дана характеристика четырнадцати режимных водопроявлений, представляющих каптированные источники и самоизливающиеся скважины, вскрывающие слаботермальные и минеральные газонасыщенные воды, и пьезометрические скважины, вскрывающие напорные пресные подземные воды без газа.

Здесь же приводятся данные о проявлении гидрогеосейсмических вариаций в режиме указанных водопроявлений, которые разделены на три типа в соответствии с механизмами сейсмического воздействия. К типу I относятся косейсмические скачки уровня воды в скважинах, вскрывающих напорные подземные воды. Амплитуды скачков составляют от десятых долей до первых десятков сантиметров (Копылова, 2005; Wakita, 1975). Такие скачки в моменты землетрясений наблюдаются в условиях статически изолированного отклика уровня воды на изменение порового давления при перераспределении напряженного состояния насыщенных пород во время образования сейсмического разрыва (Копылова, 2005). Характер скачков по площади определяется, в основном, механизмом очага землетрясения (Wakita, 1975): в области сжатия насыщенных пород происходит повышение уровня воды, в области расширения — его пони-

Таблица 1. Характеристика режимных водопроявлений и гидрогеосейсмических вариаций

Регион	Водопроявление, параметры*	Координаты, район	Глубина скважины; глубина уровня, м	Период наблюдений; продолжительность	Интервал регистрации; чувствительность	Состав и возраст пород	Характеристика флюида				Гидрогеосейсмические вариации		
							Минерализация	Химический состав	Газ, состав	T, °C	Тип I**	Тип II	Тип III
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Япония	Скв. Хаибара, Н	35° с.ш., 138° в.д. о. Хонсю, Токай	Н.д.; 6	1981-1990; 10 лет	1 час; 0.3 см	Н.д.	Пресные	Н.д.	Нет	Н.д.	?	16 понижений уровня; 1–18 см; месяцы	6 понижений скорости тренда; месяцы
	Скв. SN-3, Н	35.39° с.ш., 137.23° в.д., о. Хонсю, пр. Гифу	131; 38	04.1989-1998; 9 лет	10 мин; 1.0-0.3 см	Трещиноватые граниты К	Пресные	Н.д.	Нет	Н.д.	Нет	23 понижения уровня; 4–42 см; сутки	5 понижений уровня; 0.1-0.5 м; сутки
	Скв. КМК-100, Н	35.3° с.ш., 138.5° в.д., о. Хонсю, Канто, Какамура	116; 6	04.1985-1989; 4.5 года	1 час; 0.1 см	Аргиллит КZ	Пресные	Н.д.	Нет	Н.д.	?	2 повышения уровня; 2.2, 4 см; сутки	Нет
	Скв. КМК-500, Н		500; 3			Песчаник КZ					?	2 понижения уровня; 2.5, 3.8 см; сутки	Нет
	Ист. Юдани, Т, Q	35.1° с.ш. 134.1° в.д., о. Хонсю, Тоттори	26; самоизлив	09.1991–08.1998; 7 лет	1 час; 0.001°	Трещиноватые вулканогенные породы МZ	Слабо минерализ.	Н.д.	Есть	34	?	13 повышений температуры воды; 0.04–0.71°; сутки	Нет
США	Скв. BV, Н	35.9° с.ш., 120.5 з.д., Калифорния	30; 17	1987–09.1995; 8.75 года	15 мин; 0.03 см	Аллювий Q	Пресные	Н.д.	Есть	Н.д.	Нет	8 повышений уровня; 5.5–85 см; сутки	Нет

Таблица 1. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Армения	Скв. КАТ, удельная электропроводность, Q	39.16°с.ш. 46.21 в.д., Каджаран	147; самоизлив	04.1996 – 1999; 3.75 года	Н.д.	Н.д.	Минерализов.	Н.д.	Есть, CO <sub>2</sub>	Н.д.	?	11 пониженный уд. электропроводности; 0.4–8.1%; сутки	Нет
Камчатка	Скв. Е1, Н	53.23° с.ш. 158.52° в.д., Вост. Камчатка	665; 28	1987-1998; 10 лет	1 сут-10 мин; 1–0.2 см	Туфы N <sub>2</sub>	1.5	Cl-HCO <sub>3</sub> /Na	Есть, N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	10	нет	11 повышенный уровня; 3–29.8 см; сутки-мес.	7 понижений уровня; недели-месяцы
	Скв. ЮЗ-5, Н	53.17° с.ш. 158.41° в.д., Вост. Камчатка	800; 2	09.1997-2003; 5.3 года	10 мин; 0.2-0.1 см	Алевролиты K <sub>2</sub>	0.4	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> /Na-Ca	Нет	14	6 ко-сейсмич. скачков	1 понижение уровня; 1 м; 3 мес.	1 понижение уровня; 11 см; 3 недели
	Скв. ГК-1, Q, T, X, Г	53.28° с.ш. 158.40° в.д., Вост. Камчатка, Пиначево	1261; самоизлив	07.1971-2003; 32.5 лет	3 сут	Туфы N <sub>2</sub>	10	Cl/Na-Ca	Есть, CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub>	28	?	9 повышенный концентрации Cl <sup>-</sup> и др. компонентов хим. состава воды	9 понижений концентрации Cl <sup>-</sup> ; 1 повышение; месяцы
	Скв. Морозная, Q, T, X, Г	53.17° с.ш. 158.27° в.д., Вост. Камчатка, Морозная	600; самоизлив	09.1983-2003; 19.3 года		Туфы N <sub>2</sub>	0.2	SO <sub>4</sub> /Ca-Na	Нет	16	?	Изменение концентраций HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> – 3 случая, недели–первые месяцы	
	Скв. Хлебозавод, X, Г	53.08° с.ш. 158.60° в.д., Вост. Камчатка, Петропавловск	2500; самоизлив	1992-2003; 11 лет		Алевролиты K <sub>2</sub>	10	Cl/Na	Есть, CH <sub>4</sub> -N <sub>2</sub>	6	?	Изменение концентраций Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> – 2 случая, месяцы	

Таблица 1. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Скв. ГК-15, X,Г	53.80° с.ш. 158.03° в.д., Вост. Камчатка, Верхняя Паратунка	1209; самоизлив	1989-2003; 15 лет	6 сут	Туфы N <sub>2</sub>	1.0	SO <sub>4</sub> /Na-Ca	Есть, N <sub>2</sub>	30	?	2 повышения концентрации СГ; сутки	Понижение концентрации СГ - 1 случай, месяцы
	Ист. 1, Q,Т, X, Г	53.28° с.ш. 158.40° в.д., Вост. Камчатка, Пиначево	самоизлив	07.1971-2003; 32.5 лет	3 сут	Андезидациты Q <sub>2</sub>	0.5	Cl-HCO <sub>3</sub> /Na	Есть, N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	7	?	55 повышений дебита, 23 повышения концентрации СГ; сутки-мес	Изменение свойств водоносной системы за 0.5-2.5 года до землетрясений с M≥6.8

Примечание. \* регистрируемые параметры: Н - уровень воды, Q – дебит, Т – температура воды, X – химический состав воды, Г – химический состав свободного и/или растворенного газа; \*\* - ? – обозначает недостаток информации для однозначного выделения типа I; Н.д. – нет данных.

жение. Амплитуды скачков определяются величиной деформации водонасыщенных пород и упругими свойствами вскрытого резервуара (Копылова, 2005; Копылова, Болдина, 2004). В газонасыщенных подземных водах косейсмические скачки уровня воды, как правило, не регистрируются (Копылова, 2001, 2005; Roeloffs, 1998).

К типу II отнесены разнообразные постсейсмические вариации уровня, дебитов, температуры, химического и газового состава воды. Их формирование связано с комплексным воздействием сейсмических волн на водоносные системы скважин и источников. В пьезометрических скважинах тип II проявляется в различном по продолжительности понижении или повышении уровня вод. При этом характер постсейсмического изменения для отдельной скважины остается постоянным за все время наблюдений, например, постсейсмическое понижение уровня воды в скважинах Хаибара и SN-3 и постсейсмическое повышение уровня воды в скважинах BV и E1. Понижение уровня воды более характерно для напорных подземных вод без газа и обусловлено снижением напора в водоносной системе за счет его подстройки к улучшению фильтрационных свойств водонасыщенных пород при сейсмических сотрясениях (Копылова, 2005). В качестве механизмов увеличения проницаемости рассматриваются образование микрогидроразрывов в водовмещающих породах при прохождении сейсмических волн (Копылова, Болдина, 2005; Шмонов, Витовтова, Жариков, 2002), удаление временных барьеров из рыхлых и минерализованных осадков в трещиноватых породах на пути движения потока подземных вод (King et al., 1999, 2000).

Постсейсмическое повышение уровня воды наблюдается в напорных газонасыщенных подземных водах. Оно обусловлено, в основном, ростом пьезометрического напора в водоносной системе за счет увеличения концентрации свободного газа и понижения плотности порового флюида (Копылова, 2001; Копылова, Воропаев, 2005; Roeloffs, 1998; Wang et al., 2004).

Наиболее типичными постсейсмическими вариациями в режиме термоминеральных источников и самоизливающихся скважин являются резкое повышение дебита и более медленное и плавное изменение (преимущественно увеличение) температуры и концентраций компонентов химического состава воды (источники Юдани, Пиначевские, скважины КАТ, Морозная, ГК-1, ГК-15). Механизм резкого повышения дебита с последующим плавным понижением связан с импульсным увеличением флюидного давления в водоносной системе в момент прохождения сейсмических волн и его последующей релаксацией (Копылова, Воропаев, 2005; Roeloffs, 1998; Wang et al., 2004). Более медленные и

плавные постсейсмические вариации температуры и концентраций растворенных минеральных компонентов состава воды вызываются изменением градиентов порового давления в различных зонах водоносной системы и изменением условий смешивания контрастных по минерализации и температуре подземных вод (Копылова, Воропаев, 2005; Kitagawa, Koizumi, 2000; Wang et al., 2004).

Возможность развития постсейсмических аномалий в химическом составе и в физических свойствах воды источников и самоизливающихся скважин обусловлена наличием флюидов с разной температурой, минерализацией и концентрацией газа в различных фрагментах водоносных систем. В качестве таких фрагментов можно рассматривать гидравлически связанные зоны повышенной водопроницаемости, к которым приурочены подземные воды, различающиеся по температуре, минерализации и концентрации газа. При однородном строении водоносной системы по фильтрационным свойствам и при постоянстве состава и температуры подземной воды во всем ее объеме формирование постсейсмических гидрогеохимических и геотермических аномалий в режиме источников и скважин представляется маловероятным. Но и такие однородные фильтрационные и гидрогеохимические условия в водоносных системах термоминеральных подземных вод также маловероятны.

В тип III объединены изменения в режиме источников и скважин, которые наблюдались перед землетрясениями. Величины магнитуд таких землетрясений составляют обычно порядка 6 и более. Аномальные вариации перед землетрясениями выявлены в изменении уровня воды в скважинах Хаибара (замедление скорости восходящего тренда (Kitagawa, Matsumoto, 1996), SN-3, ЮЗ-5 (понижение уровня воды (Копылова, 2005; King et al., 1999, 2000) и E1 (увеличение скорости понижения уровня воды (Копылова, 2001)). Отсюда следует, что наиболее типичным изменением в режиме пресных напорных и термоминеральных подземных вод перед сильными землетрясениями является относительное понижение напора, которое можно объяснить развитием трещинной дилатансии и увеличением объема порово-трещинного пространства в насыщенных породах.

В изменениях режима термоминеральных самоизливающихся скважин гидрогеологические предвестники обнаруживаются по аномальным изменениям химического состава воды и газа (скважины ГК-1, Морозная, Хлебозавод, ГК-15). При этом может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение концентраций отдельных минеральных компонентов (Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Хаткевич, Рябинин, 1998, 2004). В тип III выделен также эффект относительного



уменьшения амплитуды косейсмического отклика дебита Пиначевского источника 1 в течение 0.5–2.5 года до возникновения сейсмических активизаций на Камчатке (Копылова, Воропаев, 2005). Такие проявления предсейсмических вариаций в режиме термоминеральных подземных вод указывают на возникновение аномальных физико-химических условий в водоносных системах, проявляющихся в нарушении фонового взаимодействия различных по минерализации и по газовому составу подземных вод. Объяснение этому также находится в рамках модели трещинной дилатансии. Развитие дилатансии может вызвать изменение фильтрационных связей между отдельными фрагментами водоносных систем, содержащих различные по химическому и газовому составу подземные воды. Аномальные вариации концентраций компонентов химического и газового состава воды источников и скважин отражают этот процесс. При этом особенности изменения химического и газового состава на предсейсмической стадии определяются конкретными условиями движения и смешивания контрастных по составу флюидов.

Анализ данных в табл. 1 позволяет выделить две группы водопроявлений по особенностям проявления гидрогеосейсмических вариаций. К первой группе относятся пьезометрические скважины, вскрывающие напорные пресные подземные воды без газа. Для таких скважин не имеется достоверных данных о проявлении гидрогеохимических и гидрогеотермических предвестников. Характерной формой гидрогеосейсмических вариаций в изменениях уровня воды в таких скважинах является его понижение на предсейсмической стадии, косейсмический скачок и/или постсейсмическое понижение уровня воды. При оптимальном соотношении водопроницаемости вскрытого резервуара и геометрических параметров скважины могут наблюдаться вынужденные и свободные колебания уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильных ( $M \approx 7.5-9$ ) удаленных ( $R \approx 1670-10800$  км) землетрясений (Копылова, 2005; Копылова, Болдина, 2005).

Ко второй группе относятся термоминеральные источники и пьезометрические скважины, вскрывающие газонасыщенные подземные воды. Характерными формами проявления гидрогеосейсмических вариаций в этом случае являются аномалии химического состава воды и газа на фоне снижения гидростатического напора на предсейсмической стадии и более интенсивные гидрогеохимические аномалии на фоне роста гидростатического напора на постсейсмической стадии. Определяющую роль в формировании ярких постсейсмических аномалий гидрогеодинамических параметров (увеличение дебитов,

повышение уровня воды) имеет резкий переход газа из растворенного состояния в свободное и удаление пузырьков газа из порового пространства флюидонасыщенных пород при импульсном воздействии сейсмических волн. При этом происходит резкое увеличение проницаемости насыщенных пород в водоносной системе и повышение напора (Копылова, 2001, 2005; Копылова, Воропаев, 2005; Roeloffs, 1998; Wang et al., 2004).

В табл. 2 приводится характеристика типов гидрогеосейсмических вариаций в режиме источников, самоизливающихся и пьезометрических скважин с учетом механизмов сейсмического воздействия на подземные воды, закономерностей в изменениях параметров режима различных скважин и источников, данных о пространственных масштабах проявления того или иного типа. При выделении отдельных типов учитывались также характер проявления гидрогеосейсмических вариаций по отношению к моменту землетрясения – косейсмический, постсейсмический или предсейсмический, а также основные гидрогеологические процессы в водоносных системах, вызывающие те или иные особенности в изменении регистрируемых параметров.

Всего выделено шесть типов гидрогеосейсмических вариаций в изменениях режима скважин и источников (А-Е) и три подтипа (Г1-Г3). В тип А выделены скачкообразные изменения уровня в пресных напорных водах без газа в момент землетрясения, отражающие упругий отклик порового давления на перераспределение статического напряженного состояния насыщенных пород при образовании разрыва в очаге землетрясения.

С динамическим воздействием сейсмических волн на водоносные системы напорных подземных вод связано формирование типов гидрогеосейсмических вариаций Б, В и Г. Типы Б и В характерны для пресных напорных подземных вод без газа. В тип Б выделены вынужденные и затухающие свободные колебания уровня воды в течение минут – часов на расстояниях до 11 тысяч километров от эпицентров сильных ( $M \geq 7.5$ ) землетрясений (Киссин, 1982; Копылова, Болдина, 2005; Sterling, Smets, 1971). Такие вариации уровня воды вызываются гармоническими колебаниями порового давления и резонансным эффектом усиления вариаций порового давления в системе скважина-резервуар при прохождении низкочастотных поверхностных волн (Cooper et al., 1965). Характер вынужденных колебаний уровня воды – косейсмический. Свободные колебания уровня воды имеют постсейсмический характер.

Тип В представляет преимущественное понижение уровня воды после землетрясений с его последующим возвращением к фоновому положению в течение суток – месяцев – первых лет. Характер – постсейсмический. Эффект может

Таблица 2. Типы гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод

Механизм сейсмического воздействия на подземные воды	Типы гидрогеосейсмических вариаций	Характер проявления, механизмы формирования, примеры
1	2	3
Изменение напряженного состояния резервуаров напорных подземных вод вследствие перераспределения статического поля напряжений при образовании разрыва в очаге землетрясения	А. Скачкообразное повышение или понижение уровня воды в момент землетрясения в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды без газа, на расстояниях до десятков-первых сотен километров от эпицентра	Косейсмический. Упругий отклик порового давления на изменение напряженного состояния водонасыщенных пород. Скважина ЮЗ-5
Деформация водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн, излучаемых из очага землетрясения (может сопровождаться гармоническими колебаниями порового давления, изменением проницаемости водовмещающих пород, нарушением сплошности водоупоров, фазовыми изменениями в составе порового флюида; изменениями условий смешивания подземных вод, различающихся по минерализации, газовому составу и температуре)	Б. Вынужденные и свободные колебания уровня воды в течение минут-часов в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды без газа, на расстояниях до 11 (?) тысяч километров от эпицентра	Косейсмический и постсейсмический. Гармонические колебания порового давления и резонансный эффект усиления вариаций порового давления при прохождении поверхностных сейсмических волн. Скважина ЮЗ-5
	В. Преимущественное понижение и последующее восстановление уровня воды в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды без газа, на расстояниях до сотен-первых тысяч километров от эпицентра	Постсейсмический. Повышение проницаемости насыщенных горных пород, подстройка порового давления к изменившимся фильтрационным свойствам; нарушение сплошности водоупоров и формирование временных потоков; стабилизация напора в резервуаре. Скважины ЮЗ-5, Хаибара, SN-3, КМК-500
	Г1. Длительное (сутки-первые месяцы) повышение уровня воды в пьезометрических скважинах, вскрывающих газонасыщенные подземные воды, на расстояниях до сотен километров до эпицентра	Постсейсмический. Увеличение напора за счет перехода растворенного газа в свободное состояние и уменьшения плотности флюида. Скважины E1, BV
	Г2. Резкое (в течение минут-часов) увеличение дебита источников и самоизливающихся скважин с последующим возвращением к фоновым величинам (газонасыщенные термоминеральные подземные воды) на расстояниях до сотен-первых тысяч километров от эпицентра. Г3. Плавное синхронное повышение, реже понижение, температуры, концентраций компонентов химического и газового состава газонасыщенных термоминеральных вод с последующим возвращением к фоновым величинам; наблюдается в течение суток-месяцев-лет в зонах с интенсивностью сотрясений не менее 2-5 баллов по шкале MSK-64 на расстояниях до сотен-тысяч километров от эпицентра	Постсейсмический. Увеличение порового давления, выделение свободного газа, релаксация давления; неравномерное изменение давления по глубине вследствие различия концентрации газа и упругих свойств в различных фрагментах водоносной системы, изменение условий смешивания контрастных по минерализации и по температуре подземных вод. Скважина КАТ, источники Пиначевские, Юдани

Таблица 2. Окончание

1	2	3
Изменение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород на различных стадиях формирования мезоструктуры очаговой области сильного землетрясения; развитие трещинной дилатансии и предсейсмических движений	Д. Преимущественное понижение уровня воды в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды, за сутки – недели – месяцы до землетрясений на эпицентральных расстояниях до 1300 км (гидрогеодинамические предвестники)	Предсейсмический. Увеличение порово-трещинного пространства и понижение напора; упругий отклик порового давления. Скважины ЮЗ-5, SN-3, Хаибара, Е1
	Е. Проявление аномалий в химическом и газовом составе воды источников и самоизливающихся скважин (термоминеральные газонасыщенные подземные воды) за недели-месяцы до землетрясений ( $M \geq 6.0$ ) на гипоцентральных расстояниях не более десятков-первых сотен километров от эпицентра (гидрогеохимические предвестники)	Предсейсмический. Изменение фоновых условий смешивания и гидродинамического взаимодействия контрастных по химическому и газовому составу подземных вод. Скважины ГК1, Хлебозавод, Морозная, ГК15

проявляться на расстояниях до сотен – первых тысяч километров от эпицентров землетрясений. Механизм формирования таких понижений уровня воды связан с деформацией и увеличением проницаемости насыщенных пород при прохождении сейсмических волн и подстройкой порового давления к изменившимся фильтрационным свойствам. Последующее повышение уровня воды отражает стабилизацию напора в резервуаре, который задается постоянством областей питания и разгрузки и восстановлением фильтрационных свойств насыщенных пород (Копылова, 2005).

В тип Г с подтипами 1-3 выделены постсейсмические изменения в режиме термоминеральных газонасыщенных подземных вод в результате динамического воздействия сейсмических волн. Выделение подтипов обусловлено характерными особенностями гидрогеосейсмических вариаций и различием механизмов их формирования в режиме пьезометрических и самоизливающихся скважин (источников). В тип Г1 выделено плавное повышение уровня воды в пьезометрических скважинах после землетрясений, которое объясняется переходом растворенного газа в свободное состояние, уменьшением плотности флюида в стволе скважины и повышением гидростатического напора. Типы Г2 и Г3 выделяются для источников и самоизливающихся скважин. К типу Г2 относится резкое повышение дебитов с последующим длительным восстановлением, а к типу Г3 относятся плавные изменения концентраций компонентов химического состава и температуры воды. В формировании гидрогеосейсмических вариаций типа Г2 ведущую роль играет повышение давления в водоносной системе, а образование эффектов типа Г3 обусловлено изменением градиентов порового давления между различными фрагментами водоносной системы, вынужденной конвекцией подземных вод и изменением условий смешивания контрастных по минерализации и по температуре флюидов.

Предсейсмические вариации в режиме подземных вод разделены на два типа - Д и Е. Вариации типа Д (гидрогеодинамические предвестники) проявляются в преимущественном понижении уровня воды в пьезометрических скважинах при развитии трещинной дилатансии в водонасыщенных породах. Продолжительность таких изменений уровня воды перед землетрясением составляет от суток-первых недель (скважины ЮЗ-5, SN-3) до недель-месяцев (скважины Е1, Хаибара).

Недостаток данных режимных наблюдений не позволяет более подробно рассматривать особенности проявления гидрогеосейсмических вариаций типа Д в режиме газонасыщенных

подземных вод и в режиме пресных подземных вод без газа. Вместе с тем, сравнение предсейсмических вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 (пресные подземные воды без газа) и в скважине Е1 (газонасыщенные подземные воды) показывает, что скважина Е1 более чувствительна к процессам подготовки землетрясений. Понижение уровня воды с повышенной скоростью в скважине Е1 проявляется достаточно регулярно перед землетрясениями с  $M \geq 5.5 \pm 0.5$  и  $R \leq 350$  км. Продолжительность таких понижений уровня воды изменяется от первых недель до нескольких месяцев. В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 гидрогеодинамический предвестник проявлялся только однажды в течение трех недель перед землетрясением с  $M=7.8$  на расстоянии 316 км. Этот предвестник удовлетворительно объясняется развитием предсейсмической объемной деформацией расширения водовмещающих пород порядка  $1 \times 10^{-7}$  (Копылова, 2005). Такие особенности в проявлении гидрогеодинамических предвестников в режиме пресных и газонасыщенных подземных вод указывают на некоторое различие механизмов их образования и, возможно, на различную чувствительность водоносных систем с присутствием газа и без газа к процессам формирования мезоструктуры очаговых областей.

Предсейсмические аномалии в химическом и газовом составе термоминеральных подземных вод Камчатки выделены в тип Е (гидрогеохимические предвестники). Продолжительность их проявления до землетрясений с  $M=6.6-7.8$  изменяется от первых десятков суток до нескольких месяцев (Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Хаткевич, Рябинин, 1998, 2004). Относительное уменьшение продолжительности и амплитуд аномалий в химическом составе воды отмечается для скважин, вскрывающих подземные воды с относительно малой концентрацией газа (скважина Морозная, ГК-15 - в составе газа преобладает азот). Наиболее яркие и продолжительные гидрогеохимические аномалии перед землетрясениями наблюдались в изменении химического состава воды в скважинах ГК-1 и Хлебозавод, вскрывающих подземные воды, содержащие свободный газ азотно-метанового состава.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Представленная типизация гидрогеосейсмических вариаций в режиме наблюдательных скважин и источников учитывает механизмы сейсмического воздействия на режим подземных вод и различие процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций в напорных водоносных системах, содержащих пресные воды без газа и газонасыщенные подземные воды с минера-

лизацией не более 10 г/л и температурами не более 30° С.

Предложенная типизация не претендует на универсальность по отношению ко всем возможным типам подземных вод в сейсмоактивных регионах. В ней не рассматривается влияние сейсмичности на режим высокотемпературных парогидротерм, соленых вод и рассолов. Вместе с тем, данные наблюдений за режимом гейзеров в Йеллоустонском национальном парке, США; в Долине Гейзеров, Камчатка; на скважине 30 в районе Мутновского геотермального месторождения (регистрация давления парогидротерм с температурой 232° С на глубине 950 м (Кириухин, Лесных, Поляков, 2002) показывают определенное влияние землетрясений и процессов их подготовки на режим перегретых подземных вод.

В качестве основных механизмов сейсмического воздействия на режим подземных вод рассматриваются статическое перераспределение напряженного состояния водонапорных систем при образовании разрывов в очагах землетрясений; динамическое воздействие сейсмических волн, вызывающих деформацию насыщенных пород; процессы подготовки землетрясений, сопровождающиеся развитием приповерхностной зоны трещинной дилатансии. Зависимость проявления различных типов гидрогеосейсмических вариаций от параметров землетрясений — величин магнитуды  $M$  и гипоцентрального расстояния до режимного водопроявления  $R$ , представлена на рис. 2. При построении рисунка использовались данные из табл. 1, а также данные о гидрогеологических предвестниках японских землетрясений Изу-ошима-кинкай 14.01.1978 г.,  $M=7.0$  (Wakita, 1981), Kobe 17.01.1995 г.,  $M=7.2$  (Tsunogai, Wakita, 1995) и двух землетрясений в Западном Туркменистане 26.12.1986 г.,  $M=5.0$  и 7.09.1987 г.,  $M=5.4$  (Киссин, 1993).

Очевидна зависимость ко-, пост- и предсейсмических вариаций в режиме подземных вод от соотношения магнитуды и гипоцентрального расстояния землетрясений (рис. 2). Наибольшие пространственные масштабы в режиме подземных вод имеют постсейсмические эффекты типов В и Г. Для описания области их распространения в (King et al., 1999) предложена зависимость  $M \geq 2.5 \lg R$ . Некоторые термоминеральные водопроявления, (скважина КАТ, источники Пиначевский 1 и Юдани - содержат свободный газ) обладают повышенной чувствительностью к воздействию сейсмических волн. Точки, расположенные ниже линии  $M \geq 2.5 \lg R$ , соответствуют постсейсмическим вариациям, выявленным в режиме именно этих водопроявлений (рис. 2 А).

Гидрогеосейсмические вариации типа А или косейсмические скачки уровня воды расположены выше зависимости, ограничивающей об-

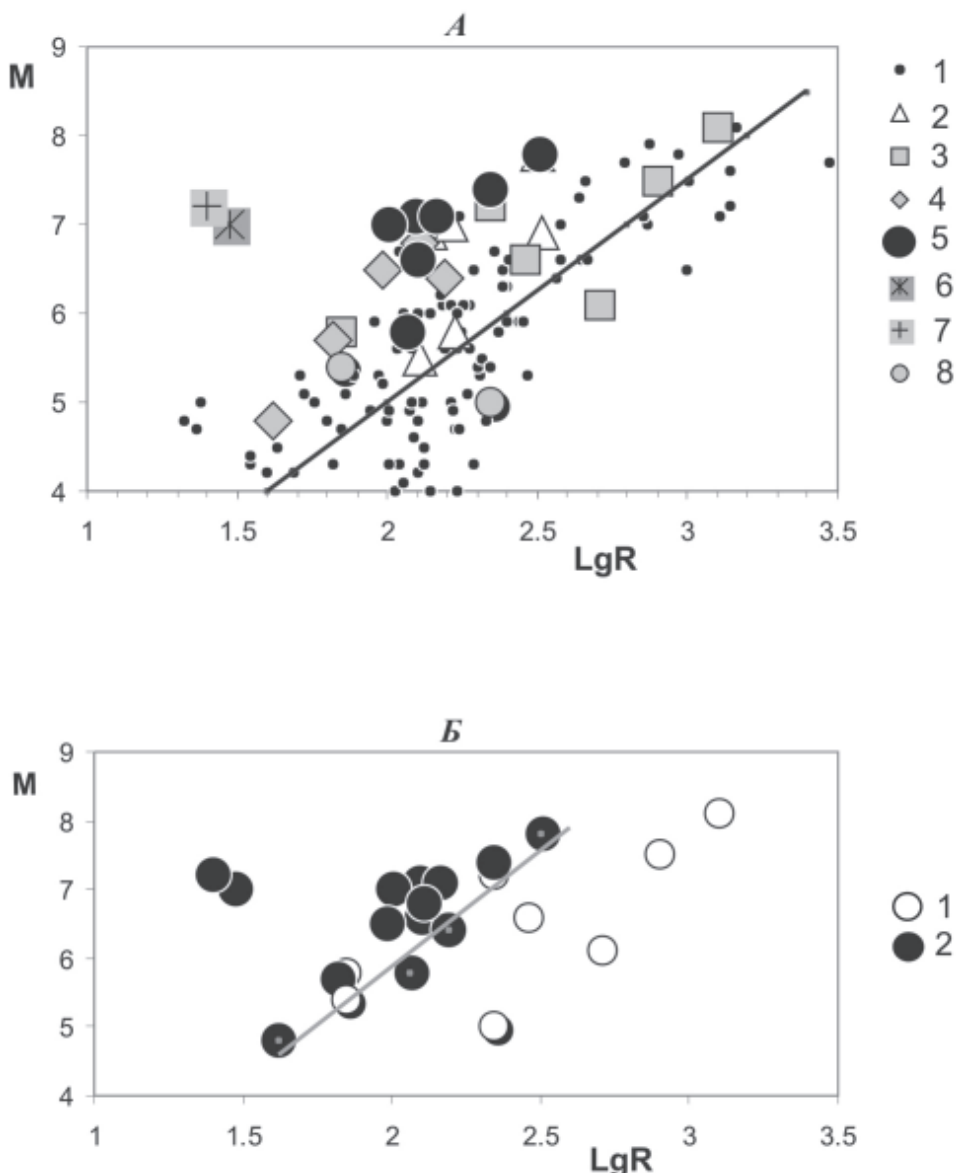
ласть проявления постсейсмических эффектов. Это указывает на меньшую пространственную область проявления косейсмических эффектов, по сравнению с постсейсмическими эффектами.

Гидрогеологические предвестники (типы Д и Е) в изменениях режима камчатских скважин, в изменениях уровня воды в скважине Хаибара, в скважине РОК перед землетрясением в Кобе, а также гидрогеологические предвестники землетрясения Изу-ошима-кинкай расположены систематически выше средних зависимостей для области ко- и постсейсмических эффектов. Но для двух скважин (SN-3, Япония, и 1ГС, Западный Туркменистан) отмечается резко повышенная чувствительность к процессам подготовки относительно удаленных землетрясений. Аномальная чувствительность скважины 1ГС к процессам подготовки двух землетрясений с  $M=5.0$  и 5.4 проявилась в понижении уровня воды с амплитудами 10 и 57 м и объясняется перетеканием подземных вод по разлому между изолированными водоносными пластами с различным поровым давлением (Киссин, 1993).

Скважина SN-3, в изменениях уровня которой наблюдалось пять понижений перед землетрясениями с  $M=6.1-8.1$  на гипоцентральных расстояниях до 800-1260 км, по-видимому, также обладает повышенной чувствительностью из-за своего расположения близ слабопроницаемого тектонического разлома на его крыле с повышенным поровым давлением подземных вод. Понижение уровня воды в скважине SN-3 перед землетрясениями объясняется временным повышением проницаемости зоны разлома и улучшением фильтрационной связи между подземными водами с различным поровым давлением (King et al., 2000).

Скважины 1ГС и SN-3 представляют примеры водопроявлений с аномально высокой тензочувствительностью к процессам подготовки землетрясений (Киссин, 1993) (рис. 2 Б). Повышенная тензочувствительность объясняется специфическими особенностями гидродинамического взаимодействия подземных вод с разными величинами порового давления при развитии трещиной дилатансии в процессе формирования мезоструктуры очаговых областей. Наблюдения на водопроявлениях с повышенной тензочувствительностью показывают, что латеральные размеры очаговых областей могут составлять сотни километров для землетрясений с  $M$  порядка 5-7 и достигать более тысячи километров для землетрясений с  $M$  порядка 8.

Вместе с тем, аномально высокая тензочувствительность водоносных систем к процессам подготовки землетрясений является скорее исключением, чем правилом. Скважины Камчатки, Хаибара и другие рассмотренные водопрояв-



**Рис. 2.** Проявление гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод в зависимости от параметров землетрясений: магнитуды  $M$  и логарифма гипоцентрального расстояния  $LgR$ . *A* – для всей совокупности пре-, ко- и постсейсмических вариаций: 1 – постсейсмические вариации типов В и Г (табл. 2); линия соответствует средней зависимости проявления постсейсмических вариаций  $M \geq 2.5LgR$  (King et al., 1999); 2 – косейсмические скачки уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка (тип А); 3–8 – гидрогеодинамические (тип Д) и гидрогеохимические (тип Е) предвестники: 3 – понижение уровня воды в скважине SN-3, Япония; 4 – замедление скорости восходящего тренда в скважине Хаибара, Япония; 5 – гидрогеодинамические предвестники в изменениях уровня воды в скважинах Е1, ЮЗ-5 и гидрогеохимические предвестники в изменениях режима скважин ГК-1, Морозная, Хлебозавод, ГК-15, Камчатка; 6 – понижение уровня воды, температуры воды и концентрации радона в течение 2-2.5 месяца перед землетрясением Изу-ошима-кинкай 14.01.1978 г.,  $M=7.0$ ,  $R=25-30$  км (Wakita, 1981); 7 – увеличение концентрации хлора в воде скважины ROK в течение шести месяцев перед землетрясением в Кобе 17.01.1995 г.,  $M=7.2$ ,  $R=25$  км (Tsunogai, Wakita, 1995); 8 – понижение уровня воды в скважине 1ГС, Западный Туркменистан, перед землетрясениями 26.12.1986 г.,  $M=5.0$ ,  $R=220$  км и 7.09.1987 г.,  $M=5.4$ ,  $R=70$  км (Киссин, 1993); *B* – для гидрогеодинамических (тип Д) и гидрогеохимических (тип Е) предвестников: 1 – по данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах SN-3 и 1ГС (кружки с тенью), обладающих аномально высокой тензочувствительностью к процессам подготовки землетрясений; 2 – по данным наблюдений на скважинах Хаибара, Е1, ЮЗ-5, ГК-1, Морозная, Хлебозавод, ГК-15 и по данным (Tsunogai, Wakita, 1995; Wakita, 1981); линия соответствует зависимости  $M = 3.37LgR - 0.84$  и описывает область нормального проявления гидрогеологических предвестников.

ления характеризуются нормальной тензочувствительностью. Для таких скважин и источников зависимость проявления гидрогеологических предвестников от параметров землетрясений может описываться выражением  $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$  (рис. 2 Б). Отсюда следует, что характерные размеры зоны приповерхностного развития дилатансии в очаговой области землетрясений с  $M$  порядка 5 составляют примерно 50 км, для землетрясений с  $M$  порядка 6 – 100 км, для землетрясений с  $M=7$  – 200 км, для землетрясений с  $M$  порядка 8 – 420 км.

Проведенный анализ данных специализированных режимных наблюдений на скважинах и источниках в сейсмоактивных районах мира показывает, что гидрогеологические предвестники могут проявляться в режиме напорных пресных подземных вод и в режиме газонасыщенных подземных вод лишь при попадании режимного водопроявления в область развития трещинной дилатансии. Это возможно при оптимальном расположении режимного водопроявления по отношению к потенциальному очагу землетрясения. В этом отношении, расположение режимных водопроявлений Камчатки представляется достаточно благоприятным для обнаружения гидрогеологических предвестников землетрясений с  $M=7-8$  на гипоцентральных расстояниях от 100 до 400 км.

## ВЫВОДЫ

1. На основе анализа данных специализированных многолетних наблюдений на скважинах и источниках в сейсмоактивных районах мира разработана типизация гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод, учитывающая:

- механизмы сейсмического воздействия на водонапорные системы (статическое, динамическое, процессы подготовки землетрясений);
- виды режимных водопроявлений (пьезометрические скважины, самоизливающиеся скважины и каптированные источники);
- гидрогеологические особенности (наличие или отсутствие газа в водоносной системе);
- параметры землетрясений (магнитуда, гипоцентрального расстояние).

Выделены три основных вида гидрогеосейсмических вариаций - косейсмические, постсейсмические, предсейсмические, соответствующих основным механизмам сейсмического воздействия на режим подземных вод.

2. Установлено различие в проявлении гидрогеосейсмических вариаций в напорных водах без газа и в термоминеральных газонасыщенных подземных водах. Это указывает на важную роль процесса газогенерации в формировании особенностей гидрогеосейсмических эффектов в

режиме подземных вод сейсмоактивных регионов.

3. Показана зависимость пространственного проявления ко-, пост- и предсейсмических вариаций параметров режима подземных вод от величины магнитуды землетрясения. Предсейсмические вариации в режиме напорных подземных вод (гидрогеологические предвестники) обусловлены, в основном, развитием приповерхностной зоны трещиной дилатансии в насыщенных горных породах в процессе формирования мезоструктуры очаговой области землетрясения. Область их проявления описывается зависимостью  $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$ , где  $M$  – магнитуда землетрясения,  $R$  – гипоцентрального расстояние, км.

## Список литературы

*Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е.* О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып.32. М.: ГЕОС, 2001. С. 81-97.

*Гриц Г.Н.* Роль геодинамических факторов в формировании режима гидротерм на примере Пиначевских источников (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 30-37.

*Гольдин С.В.* Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37-54.

*Гольдин С.В.* Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 5-14.

*Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1984. 189 с.

*Кирюхин А.В., Лесных М.Д., Поляков А.Ю.* Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51-60.

*Киссин И.Г.* Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58-69.

*Киссин И.Г.* Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.

*Ковалевский В.С.* Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 152 с.

*Копылова Г.Н.* Анализ влияния сейсмичности на режим Пиначевских термопроявлений на Камчатке (по результатам наблюдений в 1979-1988 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 3-18.

*Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39-52.

- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважинах под влиянием землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 113-126.
- Копылова Г.Н.* Гидрогеодинамический мониторинг сейсмотектонических процессов на Камчатке // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Матер. 2-го междунар. симпозиума 12-16 сентября 2005 г. Академгородок, Новосибирск. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 156-160.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53-70.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка порупругих параметров резервуаров подземных вод по данным равномерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 405-421.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 на катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г.,  $M=9$  // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2005. С. 140-147.
- Копылова Г.Н., Воропаев П.В.* Отклик режимного источника на землетрясения как индикатор состояния его водоносной системы // Вулканология и сейсмология. 2005. № 2. С. 32-44.
- Копылова Г.Н., Воропаев П.В.* Моделирование гидрогеохимических аномалий в подземных водах, вызванных землетрясениями // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: Матер. 2-го междунар. симпоз. 12-16 сентября 2005 г. Академгородок, Новосибирск. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 196-202.
- Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
- Пиннекер Е.В., Киссин И.Г., Ясько В.Г.* Подземная гидросфера и сейсмические процессы / Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 57-78.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидродинамические и газогидрохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97 // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский, 1998. С. 134-147.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96-112.
- Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В.* Влияние сейсмической вибрации на проницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов // Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. С. 155-161.
- Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R.* The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915-3926.
- Igarashi G., Wakita H.* Tidal response and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B3. P. 4269-4278.
- King C.-Y., Azuma S., Igarashi G. et al.* Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № B6. P. 13073-13082.
- King C.-Y., Azuma S., Ohno M. et al.* In search of earthquake precursors in water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan // Geophys. J. Int. 2000. V. 143. P. 469-477.
- Kitagawa G., Matsumoto N.* Detection of coseismic changes of underground water level // J. American Statistical Association. 1996. V. 91. № 434. P. 521-528.
- Kitagawa Y., Koizumi N.* A study on the mechanism of coseismic groundwater changes: interpretation by a groundwater model composed of multiple aquifers with different strain response // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № B8. P. 19121-19134.
- Roeloffs E.* Persistent water level changes in a well near Parkfield, due to local and distant earthquakes // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № B1. P. 869-889.
- Sterling A., Smets E.* Study of earth tides, earthquakes and terrestrial spectroscopy by analysis of the level fluctuations in Borehole at Haibaart (Belgium) // Geophys. J. Royal Astronom. Soc. 1971. V. 23. № 2. P. 225-242.
- Tsunogai U., Wakita H.* Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan // Science. 1995. V. 269. P. 61-63.
- Wakita H.* Water wells as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. V. 189. P. 553-555.
- Wakita H.* Precursory changes in groundwater prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake // Earthquake Prediction - An International Review, Maurice Ewing Series. № 4. Washington. Amer. Geophys. Union. 1981. P. 527-532.
- Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J.* Modelling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2000. V. 157. P. 717-726.



КОПЫЛОВА

## SEISMICITY AS A FACTOR OF UNDERGROUND WATER REGIME FORMATION

**G. N. Kopylova**

*Kamchatkan Branch of Geophysical Service Russian Academy of Sciences  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: gala@emsd.iks.ru*

On base of specialized hydrogeological observations data in seismic regions (Japan, USA, Armenia, Kamchatka) are considered seismic influence on groundwater regime. In underground water regime are revealed specific types of changes by seismic influence. These types are revealed subject to kinds of seismic effects, sorts of regime objects (springs and self-flowing wells, piezometric wells), as well as discrepancy of hydrogeoseismic effects formation in head water-bearing systems containing sweet groundwater without gas and gas-saturated groundwater.