

Копылова Г.Н.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
gala@emsd.iks.ru*

Введение

Решение задачи использования гидрогеологических предвестников в целях прогноза землетрясений основывается на данных многолетних специализированных наблюдений на источниках, пьезометрических и самоизливающихся скважинах в сейсмоактивных районах [7, 8, 20]. Такие наблюдения должны проводиться непрерывно, с разрешением по времени от первых суток до часов-минут и с высокой точностью регистрации параметров режима подземных вод.

В настоящем сообщении рассматриваются 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 [2, 10-18, 22, 23], Японии [26-30, 33-35], США [31] и Армении [36].

В методическом плане мы руководствуемся следующими положениями.

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 [2, 7-9, 19].

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 проявляются вовсе [10]. 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 перераспределении статического напряженного состояния среды в окрестностях очага землетрясения. Поэтому землетрясение может воздействовать на подземные воды двумя способами: 1 - статическим способом за счет изменения статического напряженного состояния напорных водоносных систем 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.

Теоретические модели процессов подготовки землетрясений развиваются и совершенствуются с 70-ых гг. XX в. В их основе лежат представление о стадийном характере изменения скорости деформации и прочности среды в окрестности очага землетрясения за счет самоорганизации трещинообразования в горных породах при росте тектонических напряжений [5, 21]. Эти модели демонстрируют, что в процессе подготовки землетрясения возможны стадии резкого изменения скорости деформации среды и возникновения разнообразных предвестников, в том числе и гидрогеологических.

Модель С.В. Гольдина [3, 4] 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. 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. Избыточная концентрация механических напряжений в очаговой области (может значительно превышать размеры очага землетрясения [4]) приводит к развитию аккомодационных процессов, определяющих ее специфическую пространственно–временную мезоструктуру. 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 путем ужесточения контактов смежных блоков. В типичном случае каждому типу аккомодационного процесса соответствуют подобласти очаговой зоны, в которых он наиболее интенсивно проявляется [4].

Гидрогеологические предвестники, как аномальные изменения в режиме подземной гидросферы, могут проявляться на различных этапах формирования мезоструктуры очаговой области, с момента образования концентраторов избыточных напряжений. 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 ее мезоструктуры.

Диффузия напряжений от концентратора сопровождается развитием приповерхностной области трещинной дилатансии, которая по своим латеральным линейным размерам может значительно превышать область очага землетрясения [1, 3]. Развитие дилатансии сопровождается деформацией и расширением насыщенных горных пород вследствие увеличения объема трещинно-порового пространства. По оценкам С.В. Гольдина для всего объема дилатирующей толщи упругие деформации не превышают 10^{-6} - 10^{-5} , при этом увеличение пористости может достигать $n \cdot 10^{-4}$ [3, 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 [7]. 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.

Характеристика данных режимных наблюдений и выделение типов гидрогеосейсмических вариаций

Рассматривались четырнадцать водопроявлений (каптивированные источники и самоизливающиеся скважины, вскрывающие слаботермальные газонасыщенные минеральные воды; пьезометрические скважины, вскрывающие напорные пресные подземные воды с газом и без газа), в режиме которых проявлялись гидрогеосейсмические вариации.

Все гидрогеосейсмические вариации 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 [12, 34]. 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 [12]. В области сжатия насыщенных пород происходит повышение уровня воды, в области расширения – его понижение. Амплитуды скачков определяются величиной деформации водонасыщенных пород и упругими свойствами вскрытого резервуара [13, 15]. В газонасыщенных подземных водах косейсмические скачки уровня воды, как правило, не регистрируются [11-13, 31].

К типу II отнесены разнообразные постсейсмические вариации уровней, 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 различных по продолжительности понижениях или повышениях уровня воды. 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 [12]. В качестве

механизмов увеличения проницаемости рассматриваются образование микрогидроразрывов в водовмещающих породах при прохождении сейсмических волн [16, 24], удаление временных барьеров из рыхлых и минерализованных осадков в трещиноватых породах на пути движения потока подземных вод [27, 28].

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 [11, 18, 31, 36].

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, ГК15). Механизм повышения дебита с последующим плавным понижением связан с импульсным увеличением флюидного давления в водоносной системе в момент прохождения сейсмических волн и его последующей релаксацией [17, 18, 31, 36]. 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 [18, 30, 36].

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.

В тип III объединены изменения в режиме источников и скважин, которые наблюдались перед землетрясениями. Величины магнитуд таких землетрясений составляют порядка 6 и более. Аномальные вариации перед землетрясениями выявлены в изменении уровня воды в скважинах Хаибара (замедление скорости восходящего тренда [29]), SN-3, ЮЗ-5 (понижение уровня воды [12, 13, 27, 28]) и E1 (увеличение скорости понижения уровня воды [11]). 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, ГК15). При этом может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение концентраций отдельных минеральных компонентов [14, 22, 23]. 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 [17]. Такие проявления предсейсмических вариаций в режиме термоминеральных подземных вод указывают на возникновение аномальных физико-химических условий в водоносных системах, проявляющихся в нарушении фоновых условий взаимодействия различных по минерализации и по газовому составу подземных вод. Объяснение этому также находится в рамках представлений о развитии приповерхностной зоны трещинной дилатансии. Развитие дилатансии может вызвать изменение фильтрационных связей между отдельными фрагментами водоносных систем, содержащих различные по химическому и газовому составу подземные воды. Вариации концентраций компонентов химического и газового состава воды источников и скважин отражают этот процесс. Особенности изменения химического и газового состава на предсейсмической стадии определяются конкретными условиями смешивания контрастных по составу флюидов.

Анализ исходных данных позволяет выделить две группы водопроявлений по особенностям проявления гидрогеосейсмических вариаций. К первой группе относятся пьезометрические скважины, вскрывающие напорные пресные подземные воды без газа. 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 [12, 13, 16].

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 [11-13, 18, 31, 36].

В таблице 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 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 водонапорные системы 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 ($M \approx 7.5$ и более) землетрясений [8, 16, 32]. 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 [25]. 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 проявляться на расстояниях до сотен – первых тысяч километров от эпицентров землетрясений. Механизм формирования таких понижений уровня воды связан с деформацией насыщенных пород при прохождении сейсмических волн, увеличением их проницаемости 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 [12].

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 проявления гидрогеосейсмических вариаций и различием механизмов их формирования в режиме пьезометрических скважин и самоизливающихся скважин (источников). В тип Г1 выделено плавное повышение уровня воды в пьезометрических скважинах после землетрясений. Такое повышение 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 или 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).

Предсейсмические аномалии в химическом и газовом составе термоминеральных газонасыщенных подземных вод выделены в тип Е (гидрогеохимические предвестники). Их продолжительность до землетрясений с $M=6.6-7.8$ изменяется от первых десятков суток до нескольких месяцев [14, 22, 23]. Относительное уменьшение продолжительности и амплитуды 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 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 минерализацией 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. Вместе с тем, данные наблюдений на скважине 30 в районе Мутновского геотермального месторождения (регистрация давления парогидротерм с температурой 232° С на глубине 950 м [6]) показывают определенное влияние землетрясений и процессов их подготовки на режим перегретых подземных вод.

На рис. 1 представлена зависимость проявления различных типов гидрогеосейсмических вариаций (табл.) от параметров землетрясений – величин магнитуды M и гипоцентрального расстояния R до режимного водопроявления. Очевидна зависимость ко-, пост- и предсейсмических вариаций в режиме подземных вод от соотношения магнитуды и гипоцентрального расстояния (рис. 1). Наибольшие пространственные масштабы в режиме подземных вод имеют постсейсмические эффекты типов В и Г. Для описания области их распространения в [27] 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. 1 А).

Гидрогеосейсмические вариации типа А (косейсмические скачки уровня воды) расположены выше зависимости, ограничивающей область проявления постсейсмических эффектов. Это указывает на меньшую пространственную область их проявления. Гидрогеологические предвестники (типы Д и Е) расположены систематически выше средних зависимостей для области ко- и постсейсмических эффектов. Но для двух скважин (SN-3 и IГС) отмечается повышенная тензочувствительность [7] к процессам подготовки относительно удаленных землетрясений (рис. 1 Б) вследствие специфических особенностей гидродинамического взаимодействия подземных вод с разными величинами порового давления при развитии трещиной дилатансии. 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. Для скважин и источников с нормальным проявлением гидрогеологических предвестников их зависимость от параметров землетрясений может описываться выражением $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$ (рис. 1 Б).

Таблица. Типы гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод

Механизм сейсмического воздействия на подземные воды	Типы гидрогеосейсмических вариаций	Характер проявления, механизмы формирования, примеры
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 Е1, ВV
	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

Изменение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород в процессе 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 составе воды и газа источников и самоизливающихся скважин (термоминеральные газонасыщенные подземные воды) за недели-месяцы до землетрясений (преимущественно с M порядка 6 и более) 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 ГК-1, Хлебозавод, Морозная, ГК15

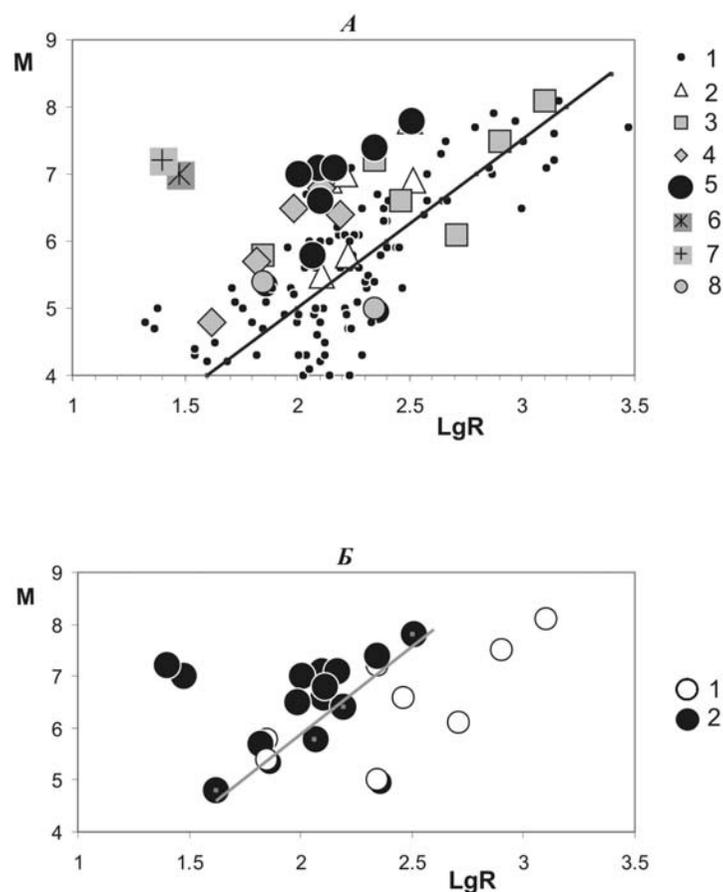


Рис. 1. Проявление гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод в зависимости от параметров землетрясений - магнитуды M и логарифма гипоцентрального расстояния $\lg R$. А – для всей совокупности пре-, ко- и постсейсмических вариаций: 1 – постсейсмические вариации типов В и Г (табл); линия соответствует средней зависимости проявления постсейсмических вариаций $M \geq 2.5 \lg R$ [27]; 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, ГК15, 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 [35]; 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 [33]; 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 [7]; Б – 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, ГК15 и по данным [33, 35]; линия соответствует зависимости $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$ и описывает область нормального проявления гидрогеологических предвестников.

Из этой зависимости следует, что 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. 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. 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. Разработана типизация гидрогеосейсмических вариаций в режиме подземных вод, учитывающая: 1 - механизмы сейсмического воздействия на водонапорные системы (статическое, динамическое, процессы подготовки землетрясений); 2 - виды режимных водопроявлений (пьезометрические скважины, самоизливающиеся скважины и каптированные источники); 3 - гидрогеологические особенности (наличие или отсутствие газа в водоносной системе); 4 - параметры землетрясений (магнитуда, гипоцентральное расстояние).

Выделены основные виды гидрогеосейсмических вариаций (косейсмические, постсейсмические, предсейсмические), соответствующие различным 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. Область проявления гидрогеологических предвестников в режиме напорных подземных вод описывается зависимостью $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$, где M – магнитуда землетрясения, R – гипоцентральное расстояние, км. По данным о проявлении гидрогеологических предвестников в водопроявлениях с нормальной тензочувствительностью к процессам подготовки землетрясений выполнена оценка наиболее вероятных размеров зоны развития трещинной дилатансии в насыщенных горных породах в зависимости от магнитуды землетрясения.

Список литературы

1. 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.
2. Гриц Г.Н. Роль геодинамических факторов в формировании режима гидротерм на примере Пиначевских источников (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 30-37.
3. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С. 37-54.
4. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 5-14.
5. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1984. 189 с.
6. 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.
7. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58-69.
8. Киссин И.Г. Землетрясения и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
9. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 152 с.
10. 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.
11. 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.
12. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважинах под влиянием землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 113-126.
13. Копылова Г.Н. Гидрогеодинамический мониторинг сейсмостектонических 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.

14. 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.
15. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным равномерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 405 – 421.
16. Копылова Г.Н. Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 на катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г., М=9 // Матер. ежегодной конф., посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2005. С. 140-147.
17. 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.
18. 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.
19. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
20. 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.
21. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Cooper Н.Н., 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.
26. Igarashi G., Wakita H. Tidal response and earthquake-related changes in the well level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B3. P. 4269-4278.
27. 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.
28. 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.
29. Kitagawa G., Matsumoto N. Detection of coseismic changes of underground water level // J. American Statistical Association. 1996. V. 91. № 434. P. 521-528.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan // Science. 1995. V. 269. P. 61-63.
34. Wakita H. Water wells as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. V. 189. P. 553-555.
35. 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.
36. 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.