

**ОЦЕНКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНОВ РОССИИ)***Копылова Г.Н.¹, Таранова Л.Н.¹, Сдельникова И.А.²*¹*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru*²*Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, irune4ka@gstras.ru***Введение**

При использовании гидрогеологического метода поиска предвестников землетрясений необходимо учитывать особенности формирования режима подземных вод в сейсмоактивных районах, а также характер, пространственные и временные масштабы изменений в подземных водах (ПВ) при воздействии сильных коровых землетрясений. Учет гидрогеологических особенностей сейсмоактивных территорий также необходим при изучении последствий произошедших землетрясений, в частности, при построении макросейсмических карт и изосейст.

В работе рассматриваются вопросы методологии изучения гидрогеологических последствий сильнейших землетрясений на примере отдельных районов, и дается общая характеристика влияния на ПВ факторов сейсмичности, среди которых выделяются процессы подготовки землетрясений, образование различных типов сейсмодислокаций и распространение сейсмических волн.

Характеристика взаимосвязи результатов сейсмологических и гидрогеологических исследований в пределах сейсмоактивных территорий, необходимых для региональной оценки гидрогеологических последствий сильнейших землетрясений, приводится на рис. 1. Специфической особенностью использования сейсмологических данных является рассмотрение сейсмических явлений, в первую очередь, сильных землетрясений, с точки зрения отдельных факторов их воздействия на состояние геологической среды. Результаты гидрогеологических исследований в форме различных карт и схем характеризуют особенности распространения и формирования различных типов ПВ сейсмоактивной территории. Эти материалы, а также данные режимных наблюдений на скважинах и источниках, привлекаются для оценки воздействия отдельных сейсмических факторов при произошедших землетрясениях на состояние и режим характерных типов распространенных в районе ПВ. Анализ материалов режимных гидрогеологических наблюдений направлен, в первую очередь, на достоверное выделение гидрогеосейсмических вариаций в изменениях отдельных параметров режима скважин и источников, соответствующих влиянию отдельных факторов сейсмического воздействия. При отсутствии данных по проявлениям гидрогеосейсмических вариаций в режиме ПВ территории или их недостатке, может проводиться моделирование отдельных факторов сейсмичности для последующего анализа их воздействия на состояние флюидонасыщенной геологической среды и на режим ПВ.

Оценка гидрогеологических последствий сильных землетрясений с использованием приведенной схемы (рис. 1) проводилась на примере сильных ($M \geq 7$) землетрясений второй половины XX – начала XXI вв., произошедших на территории России и бывшего СССР. В качестве исходных материалов использовались: 1 - опубликованные материалы сейсмогеологического обследования землетрясений в районах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), Кавказа, Дальнего Востока и Средней Азии, составленные сейсмологическими организациями; 2 – опубликованные материалы режимных гидрогеологических наблюдений на сетях скважин и источников; 3 – результаты моделирования косейсмической деформации при Олюторском 20.04.2006 г., $M=7.6$, Коряжское нагорье, и Чуйском 27.09.2003 г., $M=7.5$, Горный Алтай, землетрясениях, а также при наиболее опасных для района г. Петропавловска-Камчатского «сценарных» землетрясениях [1].

Следует отметить, что в районах очагов Олюторского и Чуйского землетрясений выполнены комплексные сейсмогеологические и сейсмические исследования; в плейстосейстовых зонах имели место сходные гидрогеологические явления, в т. ч. массовое разжижение грунтов с извержениями воды и водонасыщенных масс. Указанные землетрясения также можно рассматривать в качестве аналогов в отношении климатических, гидрогеологических и геокриологических условий. В зоне Чуйского землетрясения с 1999 г. проводились режимные гидрогеологические наблюдения ТЦ «Алтайгеомониторинг», включающие измерения уровней воды, дебитов, наблюдения за химическим составом ПВ [2].



Рис. 1. Методология оценки гидрогеологических последствий сильнейших землетрясений в сейсмоактивном регионе

Результаты сейсмогеологического обследования эпицентральных зон и данные гидрогеологических наблюдений

Анализ материалов сейсмогеологического обследования эпицентральных районов сильных землетрясений показывает значительные изменения в состоянии грунтовых ПВ в зонах с интенсивностью сотрясений от 10 до 7-8 баллов по шкале MSK-64, которые были вызваны, в основном, разжижением грунтов и образованием вторичных сейсмодислокаций при воздействии высокочастотного сейсмического излучения. Типичными формами таких изменений являются массовые выбросы воды и водонасыщенных грунтов по трещинам в долинах рек в области распространения рыхлых четвертичных отложений (БРЗ, Горный Алтай, Корякия). Во время некоторых землетрясений отмечались залповые выбросы воды из скважин вследствие резкого повышения флюидного давления грунтовых и напорных ПВ. Наблюдалось исчезновение источников пресных и минеральных вод и образование новых источников. Такие явления указывают на изменение условий разгрузки грунтовых пресных и напорных минеральных ПВ. В некоторых эпицентральных районах БРЗ отмечалось изменение структуры местной гидросети и связанная с этим перестройка зон питания и разгрузки грунтовых ПВ.

Формирование трещинно-жильных систем напорных ПВ в относительно глубоких зонах складчатых областей связано, в основном, с развитием трещиноватости в скальных горных породах. Определяющую роль в их формировании играют глубинные разломы и трещинные системы их оперения. Во время сильных землетрясений и их афтершоков образуются новые разрывы со смещением, которые могут изменять существующую систему трещиноватости и условия формирования напорных ПВ в диапазоне глубин до первых десятков км. С использованием материалов работы [4], в которой выполнен детальный анализ развития сейсмичности в районе очага Олюторского землетрясения, оценены пространственные размеры области сейсмогенного изменения глубинной трещиноватости. По площади эта область составляет примерно 200×100 км, по глубине - от поверхности земли до 20 км. Но влияние такого масштабного изменения трещинной проницаемости на формирование ресурсов и химического состава напорных ПВ в районе очага Олюторского землетрясения можно оценить на основе проведения длительных режимных наблюдений.

Материалы режимных гидрогеологических наблюдений в сейсмоактивных районах можно разделить на две группы: 1 – ретроспективное обобщение данных наблюдений, проводимых различными организациями с целью мониторинга пресных ПВ, нефтяных и газовых месторождений (до 1970-ых гг.); 2 - результаты специализированных наблюдений на скважинах и источниках с целью поиска гидрогеологических предвестников землетрясений (примерно со второй половины 1970-х гг.).

Основными недостатками первой группы материалов являются фрагментарность временных рядов данных наблюдений и невозможность достоверного выделения пред-, ко- и постсейсмических вариаций в изменениях отдельных параметров режима ПВ с указанием их формы, продолжительности и амплитуды. Материалы специализированных наблюдений (группа 2) наиболее представительные, т. к. они дают объективную информацию об изменениях параметров режима скважин и источников с возможностью достоверного выделения различных типов гидрогеосейсмических вариаций. Определенным недостатком этих данных является то, что наблюдения за отдельными газо-гидрогеохимическими параметрами, например, за радоном, гелием или ртутью, не дают общего представления об изменениях в ПВ. Поэтому при решении задачи оценки гидрогеологических последствий сильных землетрясений можно использовать только данные наблюдений за гидродинамическими параметрами (уровни, дебиты), либо данные совместной регистрации гидродинамических и физико-химических параметров режима скважин и источников.

Определенные проблемы в объективной оценке влияния сейсмодислокаций и процессов подготовки сильных землетрясений на ПВ связаны также с весьма малым объемом данных специализированных гидрогеологических наблюдений в плейстосейстовых зонах. Например, на Камчатке наблюдения на сети скважин и источников проводятся с 1977 г., т. е. более 30-ти лет. На основе полученных данных выделены основные типы гидрогеосейсмических вариаций, проявляющихся в режиме напорных пресных и термоминеральных ПВ вод в зонах с интенсивностью сотрясений до 5-6 баллов. К основным типам гидрогеосейсмических вариаций относятся: гидрогеологические предвестники, сопровождавшие подготовку ряда сильных землетрясений с $M=6.6-7.8$ на гипоцентральных расстояниях $R=90-320$ км; косейсмическая реакция порового давления напорных пресных ПВ, проявляющаяся в скачках уровня при образовании разрывов в очагах землетрясений с $M=6.2-7.8$, $R=128-320$ км; разнообразные постсейсмические изменения уровней,

дебитов, температуры и химического состава ПВ при прохождении сейсмических волн от местных ощутимых ($I=3-6$ баллов) землетрясений. В изменениях уровня воды безнапорных и слабонапорных поровых ПВ в четвертичных отложениях гидрогеосейсмические вариации либо не проявлялись или проявлялись очень слабо. При этом достоверные данные об изменении режима различных типов ПВ в зонах с интенсивностью сотрясений ≥ 7 баллов не получены до настоящего времени.

По данным режимных наблюдений в районе Чуйского землетрясения выявлены основные тенденции в изменении химического состава ПВ: их разбавление до землетрясения, сопровождавшееся уменьшением концентраций компонентов химического состава воды в течение первых лет до события, и формирование локальных гидродинамических и гидрогеохимических аномалий за счет увеличения разгрузки глубинных минерализованных вод после землетрясения [2].

Результаты моделирования косейсмической деформации при Олюторском и Чуйском землетрясениях

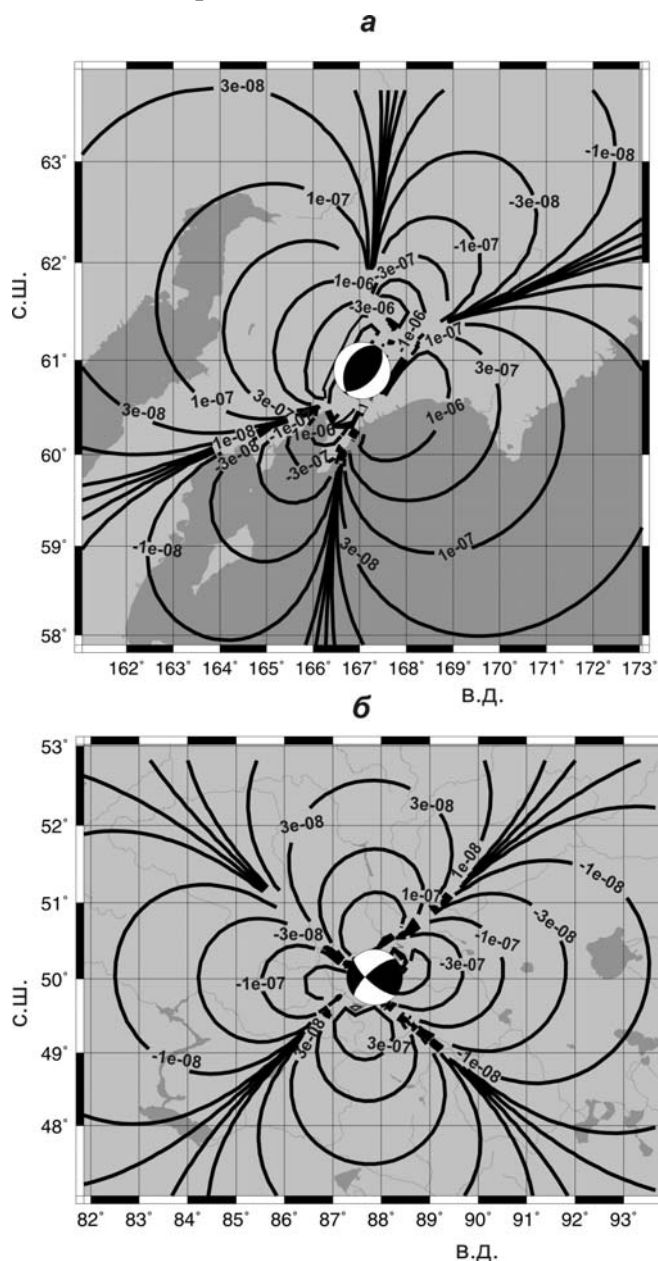


Рис. 2. Горизонтальные распределения объемной косейсмической деформации при Олюторском (а) и Чуйском (б) землетрясениях на глубине 500 м по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве [6] с механизмами очагов из международного каталога Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>)

На рис. 2 приводятся результаты моделирования объемной косейсмической деформации на глубине 500 м при двух землетрясениях. Расчеты выполнены в секторе геодинамического мониторинга Геофизической службы РАН.

Величины косейсмической деформации сжатия и расширения водовмещающих пород в плейстоценовых зонах при обоих землетрясениях могли достигать $10^{-7}-10^{-6}$. Области развития деформации с величинами $\geq 10^{-8}$ составляют десятки тысяч кв. км. С использованием средних величин упругих параметров резервуаров на глубине 500 м [3] получено, что разнонаправленные изменения порового давления в зоне деформаций с величинами 10^{-7} составляют от первых десятков см до 1 м водяного столба; в зоне с величинами деформации 10^{-6} – от метров – до первых десятков метров (до 2 атм). Наиболее контрастные косейсмические изменения напора в трещинных ПВ следует ожидать в зоне сгущения изолиний.

Оценка последствий сильнейших «сценарных» землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского

В работе [1] приводится характеристика наиболее опасных «сценарных» землетрясений вблизи г. Петропавловска-Камчатского с указанием механизмов и размеров очагов, а также даются распределение 7-9 балльных изосейст и оценки движений грунта (скоростей и ускорений) в отдельных точках. Для трех наиболее часто (одно событие в 50-300 лет) повторяющихся событий: субдукционных надвигов FZ9, $M=9$ и FZ8, $M=8.4$, и крутопадающего взброса AVS, $M=7.8$, выполнено моделирование горизонтального распределения объемной косейсмической деформации на глубине 500 м.

В случае события FZ9 в полуостровной части Камчатки величины деформации могут достигать 10^{-5} и сопровождаться

косейсмическими скачками порового давления в напорных водах с амплитудами до нескольких бар. В областях сгущения изолиний косейсмической деформации могут также ожидать градиентные вариации порового давления по простиранию. При событии FZ8 площадь развития деформаций с величинами 10^{-6} - 10^{-5} также достаточно велика, а при событии AVS область деформации с величинами 10^{-5} и более распространяется практически на всю южную часть Камчатского полуострова.

Величины ускорений на средних грунтах в районах гг. Петропавловск-Камчатский – Елизово - Вилючинск при рассматриваемых событиях составляют 0.09-0.33g [1]. По [6] рост порового давления до геостатических величин в неглубоко залегающих грунтовых водоносных горизонтах и разжижение водонасыщенных пород с выбросами воды может происходить при достижении ускорения на поверхности величины 0.21g. Поэтому при всех трех «сценарных» землетрясениях можно ожидать массовое разжижение рыхлых обводненных грунтов с выбросами воды и грязевых масс на поверхность земли.

Заключение

В качестве основных факторов воздействия сильных коровых землетрясений на ПВ сейсмоактивных регионов необходимо рассматривать: 1 - образование первичных сейсмодислокаций со смещением в диапазоне глубин до первых десятков км и региональное изменение структуры трещинной проницаемости напорных ПВ; 2 - высокочастотное сейсмическое излучение и образование вторичных сейсмодислокаций в пределах плейстосейстовой области (трещины, оползни, обвалы, разжижение водонасыщенного грунта), оказывающих локальное влияние на режим грунтовых ПВ, а также на условия разгрузки напорных ПВ; 3 - изменение статического напряженного состояния резервуаров напорных ПВ при образовании разрывов в очагах землетрясений (по результатам моделирования косейсмической деформации амплитуды изменения порового давления могут составить несколько атмосфер); 4 - изменение напряженно-деформированного состояния резервуаров напорных пресных и термоминеральных ПВ при прохождении сейсмических волн, сопровождающееся постсейсмическими вариациями уровней, дебитов, температуры и химсостава воды источников и скважин в зоне сотрясений с интенсивностью $I \geq 3$ балла; 5 - воздействие поверхностных сейсмических волн от сильнейших ($M \geq 7.6$) землетрясений на состояние систем «скважина-резервуар», сопровождающееся разнообразными вариациями уровня воды в скважинах на расстояниях до тысяч км от эпицентров; 6 - процессы подготовки землетрясений, влияние которых на режим ПВ слабо изучено специализированными наблюдениями в плейстосейстовых зонах.

Необходимым условием объективной оценки роли сейсмодислокаций и процессов подготовки землетрясений в формировании режима различных типов ПВ является проведение постоянных долговременных специализированных гидрогеологических наблюдений в сейсмоактивных регионах, включающих регистрацию гидрогеодинамических и гидрогеохимических параметров режима источников и скважин.

Список литературы

1. Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН». 2005. № 1(23).
2. Кац В.Е., Робертус Ю.В. Гидрогеологические особенности в эпицентральной части Чуйского землетрясения // Матер. научно-практич. конф. «Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия». Горно-Алтайский ун-т, 2004. http://e-lib.gasu.ru/konf/zemletr04/R_10.html.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17-28.
4. Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И. Олюторское землетрясение 20 (21) апреля 2006 г. $M_w=7.6$: сейсмическая история региона и предварительные результаты исследования серии афтершоков // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 14-33.
5. Holzer T.L., Youd T.L., Hanks T.C. Dynamics of liquefaction during the 1987 Superstition Hills, California, earthquake // Science. 1989. V. 244. P. 56-59.
6. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1135-1154.