

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД В СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

Г.Н. Копылова

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

Геодинамический режим Камчатского региона характеризуется высокой сейсмичностью, проявлениями активного вулканизма и современных движений земной коры. Широкое распространение здесь имеют также вторичные процессы, такие как цунами, образование различных типов сейсмодислокаций, оползней и обвалов горных пород, сопровождающихся катастрофическими последствиями для населения и инфраструктуры территории и состояния природной среды. Одним из способов уменьшения экономического ущерба при активизации современных геодинамических процессов в регионе является прогноз времени возникновения сильных землетрясений на основе проведения комплексного геофизического мониторинга, включающего сейсмологические, геодезические, геохимические и другие виды наблюдений, направленные на диагностику предвестников землетрясений.

Гидрогеологический метод поиска предвестников землетрясений основывается на чувствительности подземной гидросферы к изменениям напряженно-деформированного состояния земной коры на стадиях подготовки землетрясений и вулканических извержений. Такая чувствительность может проявляться в аномальных изменениях гидродинамических и гидрогеохимических параметров режима подземных вод. Основу метода составляет проведение регулярных наблюдений за параметрами режима источников и скважин. На территории Петропавловского геодинамического полигона такие наблюдения проводятся с 1977 г. Важным результатом работ является обнаружение аномальных изменений уровня и химического состава подземных вод перед наиболее сильными ($M \geq 6.6$) землетрясениями Камчатки, сопровождавшихся сотрясениями интенсивностью до 5-6 баллов в районах наблюдательных пунктов. Пример проявления гидрогеологических предвестников перед Шипунским землетрясением 2.03.1992 г. приводится на рисунке. Здесь также представлены предвестниковые изменения сейсмологического параметра RTL [Соболев, 1999] и длин линий светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная [Левин и др., 2006]. Как видно, большая часть аномальных изменений уровня воды, химического состава подземной воды и газа перед землетрясением имеет меньшую заблаговременность (порядка 1-2 мес.) по сравнению с сейсмологическими и геодезическими показателями. Исключение составляет изменение концентрации хлора в воде скважины ГК-1, которое наблюдалось в течение ~9 мес. перед землетрясением и по продолжительности было сопоставимо с изменениями в режиме слабой сейсмичности (параметр RTL) и с развитием горизонтального сжатия территории полигона по данным светодальномерных измерений.

В настоящее время по данным гидрогеологических наблюдений проводится регулярная оценка опасности возникновения сильных камчатских землетрясений на основе эмпирических алгоритмов [Хаткевич, 1994; Копылова и др., 1994; Копылова, 2008]. Для отдельных водопроявлений выполнена ретроспективная оценка эффективности использования данных режимных наблюдений для прогноза землетрясений, которая составляет по [Гусев, 1974] не менее 2-3 при вероятности связи предвестников и землетрясений 0.6-1.0. Это показывает, что использование гидрогеологических данных позволяет улучшить прогнозирование камчатских землетрясений в 2-3 раза, по сравнению с их случайным угадыванием. Следует отметить, что при повышении порога прогнозируемой магнитуды оценки сейсмопрогностической эффективности гидрогеологических данных повышаются.

Основной научно-методической проблемой гидрогеологического метода является необходимость разработки адекватных моделей гидродинамических и гидрогеохимических процессов в системах скважина-резервуар подземных вод и источник - питающая водоносная система при воздействии процессов подготовки землетрясений. Анализ локальных гидрогеологических условий в районах наблюдательных водопунктов Петропавловского полигона показывает, что влияние сейсмичности проявляется, в основном, в режиме скважин, контролируемых изолированные горизонты напорных пресных подземных вод и водоносные системы термоминеральных газонасыщенных подземных вод (табл.). В первом случае могут

наблюдаться предвестники в вариациях уровня воды в пьезометрических скважинах при квазиупругом деформировании контролируемого резервуара подземных вод. Во втором случае яркое проявление гидрогеохимических предвестников обусловлено эффективным смешиванием контрастных по химическому и газовому составу вод, содержащихся в различных фрагментах термоминеральных водоносных систем, при изменении их проницаемых свойств на стадиях подготовки землетрясений.

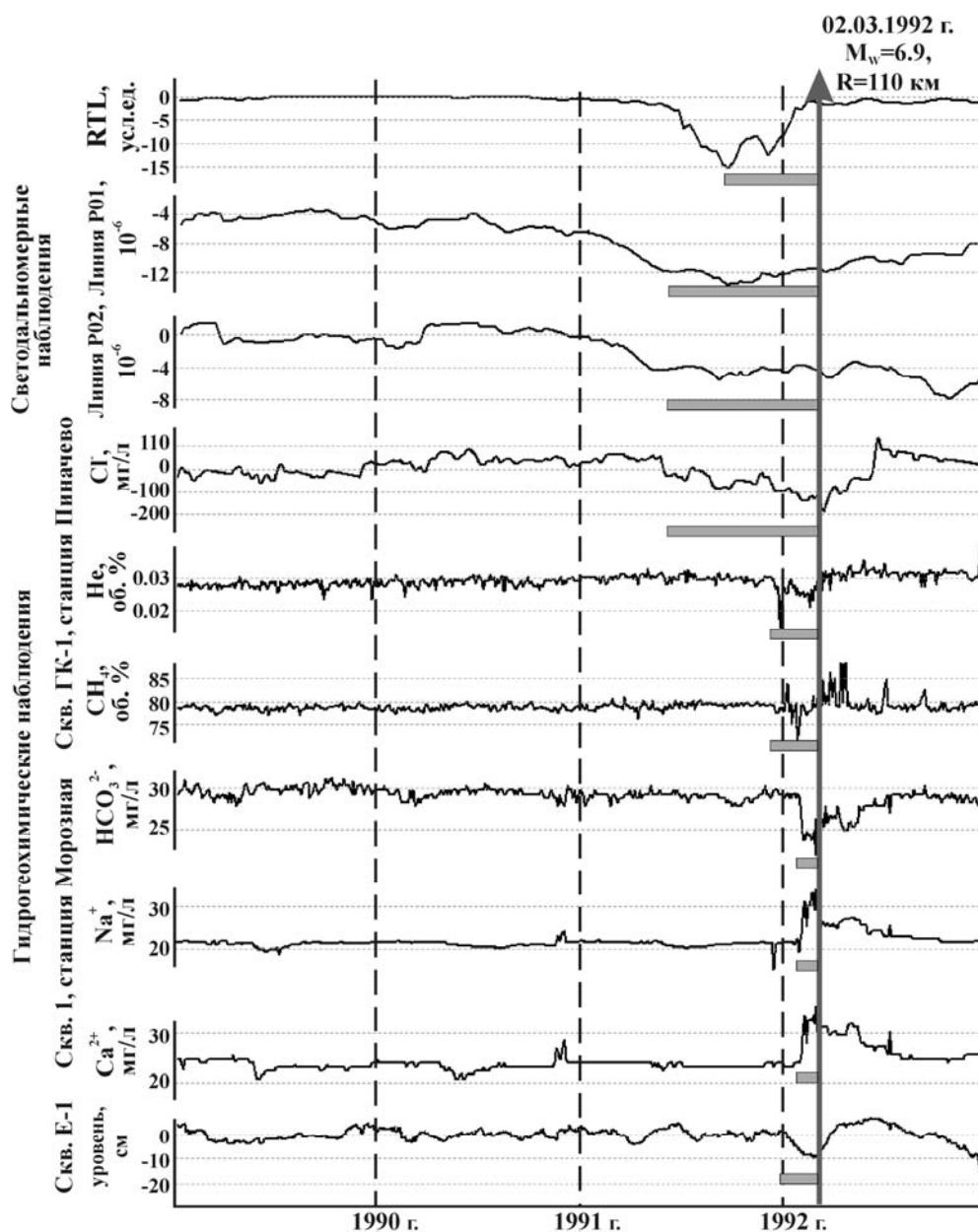


Рис. Проявление предвестников перед Шипунским землетрясением 2 марта 1992 г., $M_w=6.9$. Горизонтальными линиями выделены времена проявления предвестников в различных параметрах. R – расстояние до центра Петропавловского полигона.

В [Копылова, 2006, 2008] обобщены данные о проявлении гидрогеологических предвестников на Камчатке и в других сейсмоактивных районах мира и рассмотрена возможность упругого и более универсального неупругого (дилатансионного) механизмов образования гидрогеологических предвестников. В [Копылова, 2006] также представлена типизация гидрогеосейсмических вариаций параметров режима подземных вод, которые могут проявляться на пред-, ко- и постсейсмических стадиях землетрясений. Предполагая, что большая часть гидрогеохимических и гидродинамических предвестников в режиме пьезометрических скважин, контролирующих газонасыщенные термоминеральные воды, обусловлены развитием трещинной дилатансии в водовмещающих породах, оценена область ее

развития в зависимости от магнитуды последующего землетрясения: $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$, где M – магнитуда землетрясения, R – гипоцентрального расстояние, км.

При упругом механизме образования гидрогеодинамических предвестников возникает возможность количественной точечной оценки предсейсмической деформации резервуара подземных вод по уровнемерным данным. В работах Г.Н. Копыловой и С.В. Болдиной, 2006-2008 гг. дано объяснение гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения, проявившегося в течение 3-х недель в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, упругим откликом порового давления на масштабные предсейсмические движения в области очага. Оценка квазиупругой объемной деформаций резервуара подземных вод на стадии подготовки землетрясения проводилась с учетом приливной чувствительности уровня воды и составила порядка $1 \cdot 10^{-7}$. При этом использовалась простая модель однородного изотропного изолированного резервуара подземных вод, в котором процессами фильтрации можно пренебречь (статически-изолированные условия).

Таблица. Гидрогеологическая характеристика наблюдательных скважин и источников на территории Петропавловского полигона.

Пункт, водопроявление	Гидрогеологическая структура	Гидродинамическая зона по [Манухин, 1971]	Тип подземных вод	Влияние сейсмичности*
Пиначево скв. ГК-1, источники 1, 2, 3	Авачинская вулканотектоническая депрессия, Авачинский адбассейн	зона свободного водообмена термальных вод	термальные азотно-метановые трещинные и поровые воды	+
Скв. НИС-1	Петропавловский горст, локальная погребенная депрессия в пределах адмассива	зона свободного водообмена холодных вод	слабонапорные холодные поровые воды в рыхлых четвертичных отложениях	-
Морозная, скв. 1	Начикинская складчато-глыбовая зона, грабен р. Быстрой	зона свободного водообмена холодных вод	напорные холодные трещинно-жильные воды в вулканогенно-осадочных неогеновых отложениях	+
Морозная, скв. 2	Начикинская складчато-глыбовая зона, грабен р. Быстрой	зона свободного водообмена холодных вод	безнапорные холодные поровые воды в рыхлых аллювиальных отложениях четвертичного возраста	-
Скв. Е1	Авачинская ВТД, Авачинский адбассейн	зона затрудненного водообмена	напорные холодные минеральные воды азотно-метанового состава в вулканогенно-осадочных отложениях неогенового возраста	+
Верхняя Паратунка, скв. ГК-15 и др.	Начикинская складчато-глыбовая зона, Паратунский межгорный артезианский бассейн	зона свободного водообмена термальных вод	термальные трещинно-жильные воды азотного состава в вулканогенно-осадочных отложениях палеоген-неогенового возраста	+
Хлебозавод, скв. Г-1	Петропавловский горст, локальная депрессия в пределах адмассива	зона затрудненного водообмена	напорные холодные минеральные воды азотно-метанового состава в метаморфизованных терригенных отложениях поздне мелового возраста	+
Скв. ЮЗ-5	Склон Авачинской ВТД, выступ фундамента в пределах адбассейна	зона свободного водообмена холодных вод	напорные холодные трещинные воды в метаморфизованных терригенных отложениях поздне мелового возраста	+

На основе количественной оценки величин барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды и применения формул теории пороупругости к таким системам оценивались упругие параметры резервуара (дренированная сжимаемость, удельная упругая емкость) и построена модель инерционности водообмена с учетом упругих и фильтрационных параметров резервуара и геометрических размеров скважины. В [Копылова и др., 2007] обобщены данные уровневых наблюдений по 32-м скважинам Роснедра и КФ ГС РАН, расположенным в сейсмоактивных районах России. Показано, что статически изолированные условия достаточно широко распространены и их наличие можно оценивать по результатам кросс-спектрального анализа вариаций уровня и атмосферного давления и приливного анализа вариаций уровня воды в наблюдательных скважинах.

Построение моделей формирования гидрогеохимических предвестников в режиме самоизливающихся скважин и источников является на порядок более сложной задачей по сравнению с построением модели упругого отклика статически изолированной системы скважина-резервуар. В этом случае необходимо наличие данных о строении питающей водоносной системы, механизмах образования в ней контрастных по химическому и газовому составу вод, количественных параметрах диффузионно-конвективных процессов как в водоносной системе, так и в стволе скважины (выводящем канале источника). В [Копылова, Воропаев. 2006] на примере Пиначевского источника 1, в режиме которого проявляются регулярные постсейсмические вариации химического состава воды, показано, что питающая его водоносная система имеет сложное строение, характеризующееся наличием гидравлически связанных зон, содержащих контрастные по химическим свойствам подземные воды. На основе схематизации гидрогеологических условий и с использованием математической модели смешивания двух контрастных по химическому составу вод в зоне повышенной водопроницаемости в невозмущенных и возмущенных условиях [Wang et al., 2004] выполнено моделирование постсейсмических аномалий дебита и химического состава воды Пиначевского источника. При этом было обнаружено, что основные параметры модели (время релаксации давления в водоносной системе, время движения потока смешанной воды через зону повышенной водопроницаемости, соотношение долей смешивающихся флюидов) изменяются во времени и зависят от интенсивности сейсмического воздействия. Это указывает на очевидную изменчивость состояния водоносной системы источника во времени.

Основными результатами многолетнего применения гидрогеологического метода на Камчатке для поиска предвестников землетрясений являются:

1 – обнаружение гидрогеологических предвестников, которые могут использоваться в комплексе с другими сейсмопрогностическими данными для среднесрочного (месяцы – недели) прогнозирования сильных ($M \geq 6.6$) камчатских землетрясений;

2 – режимные источники и скважины представляют сложные природно-технические системы, свойства которых определяются комплексом гидрогеологических и технических факторов; при этом гидрогеологические предвестники могут проявляться в особых гидрогеологических условиях (изолированные горизонты напорных подземных вод с характерными упругими свойствами; газонасыщенные термоминеральные водоносные системы, содержащие контрастные по физическим и химическим свойствам подземные воды);

3 - гипотеза о наиболее универсальном механизме образования гидрогеологических предвестников вследствие развития приповерхностной зоны трещинной дилатансии на стадиях подготовки сильных землетрясений находит косвенное подтверждение по данным наблюдений за режимом термоминеральных газонасыщенных подземных вод (скважины Е1, ГК-1, Морозная 1, Хлебозавод, Пиначевский источник 1); при развитии интенсивных предсейсмических движений на стадии подготовки землетрясения могут проявляться гидрогеодинамические предвестники в режиме напорных пресных подземных вод за счет упругого деформирования водовмещающих пород; в таком случае при наличии статически изолированных условий в системе скважина-резервуар возможна количественная оценка деформации водовмещающих пород по уровневым данным.

Список литературы

Болдина С.В., Копылова Г.Н. Гидрогеодинамические процессы в системе скважина-резервуар при сейсмических воздействиях (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Геофизика

XXI столетия: 2007 год. Сб. трудов 9-ых геофиз. чтений им. В.В. Федынского. Тверь. ООО Изд-во ГЕРС, 2008. С. 23-35.

Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск. Наука, 1974. С. 109-119.

Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2006. № 1. Вып. № 7. С. 50-66.

Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология, 2006. № 6. С. 52-64.

Копылова Г.Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996-2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский. ГС РАН, 2008. С. 24-28.

Копылова Г.Н. О связи режима подземных вод с сейсмичностью и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений // Разведка и охрана недр, 2008. № 7. С. 37-45.

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. 53-37.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2006. № 2. С. 17-28.

Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология, 2006. № 5. С. 42-48.

Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр, 2007. № 11. С. 75-83.

Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология, 2006. № 3. С. 54-67.

Манухин Ю.Ф. О зонах водообмена геотермальных районов Камчатки // Вулканизм и глубины земли. М.: Наука, 1971. С. 219-224.

Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1999. № 4-5. С. 63-72.

Хаткевич Ю.М. О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология, 1994. № 1. С. 63-67.

Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int., 2004. V. 157. P. 717-726.