

Гидрогеологические предвестники сильных землетрясений к 40-летию гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке

КОПЫЛОВА Г. Н.

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

Введение. Гидрогеологический метод поиска предвестников землетрясений основывается на результатах специализированных наблюдений за параметрами подземных вод в скважинах и источниках. С декабря 1976 г. такие наблюдения проводятся на территории Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка. В них принимали участие Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР (ИВ), Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), Камчатский центр мониторинга сейсмической и вулканической активности при Администрации Камчатской области (КЦМСиВА), Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), АО «Камчатгеология». Большой вклад в создание сети и методики специализированных гидрогеологических наблюдений внесли сотрудники ИВ В.М. Сугробов, Р.А. Шувалов, Л.В. Черткова, А.В. Кирюхин, сотрудники КФ ГС РАН Ю.М. Хаткевич, Г.В. Рябинин, А.А. Смирнов, С.В. Болдина, АО «Камчатгеология» А.С. Желтухин и Н.Н. Смолина и др.

В работе представлены результаты гидрогеосейсмических исследований на Камчатке, показывающие возможности гидрогеологического метода для поиска предвестников землетрясений и их использования при прогнозировании времени сильных землетрясений; приводятся данные о гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестниках землетрясений, зарегистрированных при проведении специализированных наблюдений КФ ГС РАН, рассматриваются перспективы их практического использования для сейсмического прогноза.

Методология и этапы исследований. Научно-методическим обоснованием работ по поиску и использованию гидрогеологических предвестников землетрясений для прогноза сильных землетрясений являются результаты выполнения трех взаимосвязанных этапов научно-исследовательских работ.

На этапе организации и проведения наблюдений (этап I) проводится оборудование скважин средствами наблюдений за вариациями гидродинамических и физико-химических параметров подземных вод, проведение наблюдений на скважинах и источниках, получение многолетних временных рядов данных наблюдений за параметрами подземных вод и выделение в них аномальных изменений перед землетрясениями (гидрогеологических предвестников).

С декабря 1976 г. КФ ГС РАН проводит наблюдения за химическим составом воды и газа на сети самоизливающихся скважин и источников. Наблюдения на пунктах Пиначево, Морозная, Хлебозавод и Верхняя Паратунка, включающих 9 самоизливающихся скважин и 3 источника, проводятся с периодичностью 1 раз в 3-6 суток. При посещении пунктов производится отбор проб воды и газа, замеры дебита объемным способом и измерения температуры воды. В составе подземной воды в лабораторных условиях определяются концентрации HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H_4SiO_4 , H_3BO_3 . В составе растворенного и свободного газа определяются методом газовой хроматографии O_2 , N_2 , Ar , CH_4 , He , H_2 , углеводородные газы [1, 6, 12].

Яркие проявления гидрогеохимических предвестников были зарегистрированы перед землетрясениями 06.10.1987 г., $M=6.6$ и 02.03.1992 г., $M=6.9$ в изменениях химического состава воды самоизливающихся скважин ГК-1-Пиначево и Морозная-1 [1, 6, 12]. Перед этими землетрясениями в составе воды скв. ГК-1 в течение 7-ми и 9-ти месяцев происходило

понижение концентрации Cl^- и других минеральных компонентов. Перед землетрясением 02.03.1992 г. в составе воды скв. Морозная-1 наблюдалось пропорциональное увеличение катионов Na^+ и Ca^{2+} и перераспределение анионов за счет относительного роста концентрации SO_4^{2-} и уменьшения концентрации HCO_3^- . Минерализация воды увеличилась на 25%. В течение двух месяцев перед этим землетрясением наблюдалось увеличение амплитуды колебаний концентраций свободных газов на скв. ГК-1-Пиначево. Также имели место постсейсмические изменения гидрогеохимических показателей в результате сейсмических сотрясений. Гидрогеохимические предвестники в форме понижения концентрации хлор-иона в воде скв. ГК-1 проявлялись перед шестью землетрясениями с $M=6.6-7.8$ из 9-ти произошедших в 1987-1999 гг. на расстояниях до 300 км от скважины.

Наблюдения за вариациями уровня воды с периодичностью 5 мин – 1 ч проводятся КФ ГС РАН и АО «Камчатгеология» на 9-ти пьезометрических скважинах глубиной 100-800 м с использованием цифровых регистраторов Кедр ДМ, оборудованных датчиками уровня воды, глубинными зондами для измерений температуры и электропроводности воды и датчиками атмосферного давления и температуры воздуха (производитель оборудования ООО Полином, г. Хабаровск). Проведение уровнемерных измерений с высокой точностью (± 0.1 см) и периодичностью 5-10 мин. позволило получить новые данные о вариациях уровня воды на стадиях подготовки и реализации сильных местных землетрясений. Были обнаружены косейсмические скачки уровня при образовании разрывов в очагах местных сильных землетрясений, разнообразные постсейсмические изменения, вызванные прохождением сейсмических волн от местных и от сильных телесеизмических событий, а также гидрогеодинамические предвестники [2, 3, 6]. Перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г., $M=7.8$ в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 проявлялся гидрогеодинамический предвестник в течение трех недель в виде синхронного понижения уровня воды в обеих скважинах [9]. В скв. Е-1 регулярно проявляется предвестник в форме увеличения скорости понижения уровня воды перед землетрясениями с $M \geq 5.0$ на расстояниях до 350 км [2, 10].

На этапе создания алгоритмов прогнозирования землетрясений (этап II) изучаются связи между проявлениями гидрогеологических предвестников и параметрами произошедших землетрясений, величинами их магнитуд M , эпицентральных расстояний R , интенсивностей сотрясений I в районах наблюдений и др. Анализ таких связей позволяет формулировать суждения относительно возможности возникновения землетрясений в некотором районе на некотором интервале времени при проявлении гидрогеологических предвестников (алгоритмы прогнозирования землетрясений). Такие алгоритмы имеют гипотетический поисковый характер и могут уточняться в процессе дальнейшего проведения наблюдений. Примеры алгоритмов прогнозирования по данным наблюдений за химическим составом воды самоизливающихся скважин приводится в [1], по данным уровнемерных наблюдений в скв. Е-1 – в [2, 5].

На этапе III проводится оценка надежности гидрогеологических предвестников и предложенных на их основе алгоритмов прогнозирования землетрясений путем ретроспективного анализа связи предвестников и землетрясений с учетом результатов их практического использования. Степень обоснованности предвестников и алгоритмов может уточняться в зависимости от изменения количества данных о гидрогеологических предвестниках и представительности обучающей выборки землетрясений, сопровождавшихся гидрогеологическими предвестниками. Характеристикой представительности обучающей выборки землетрясений, которым предшествовали гидрогеологические предвестники, является соотношение между величинами их магнитуд и локализацией (удаленностью) по отношению к наблюдательным скважинам.

Ретроспективная оценка сейсмопрогностической информативности гидрогеологических предвестников основывается на результатах их параметрического описания [10]. Если гид-

рогеологический предвестник имеет параметрическое описание, то он относится к категории параметрических предвестников, для которых возможно создание вероятностных алгоритмов прогнозирования землетрясений. Пример параметрического описания гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скважине Е-1 приводится в [2, 5, 10].

С использованием данных специализированных гидрогеологических наблюдений КФ ГС РАН и АО “Камчатгеология” и эмпирических алгоритмов регулярно выдаются оценки опасности возникновения сильных землетрясений на Камчатке с представлением заключений в Камчатский филиал РЭС [10, 13]. Для отдельных режимных водопроявлений выполнены ретроспективные оценки эффективности использования гидрогеологических предвестников для среднесрочного сейсмического прогноза, которые составляют $I = 2-3$ при величинах $P = 0.6-1.0$. Это показывает, что использование гидрогеологических данных позволяет улучшить прогнозирование землетрясений в 2-3 раза, по сравнению со случайным угадыванием.

Результаты. В [4, 6] 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. Полагая, что большая часть гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников обусловлены развитием трещинной дилатансии в водовмещающих породах на стадии подготовки землетрясений, оценена область развития дилатансии в верхних горизонтах земной коры в зависимости от соотношения величин магнитуды M и гипоцентрального расстояния R (км) последующего землетрясения: $M \geq 3.37 \lg R - 0.84$.

При реализации упругого механизма образования гидрогеодинамических предвестников возникает возможность количественной оценки предсейсмической деформации водовмещающих пород по уровнемерным данным. По данным о проявлении гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (КЗ) в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 выполнена оценка величины объемной деформации расширения водовмещающих пород на стадии его подготовки ($0.7 \cdot 10^{-7}$) [3, 6, 9]. Предполагалось, что бухтообразное понижение уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 в течение трех недель перед КЗ представляло упругий отклик порового давления на предсейсмические движения в области его очага. При этом использовалась модель однородного изотропного резервуара подземных вод в статически изолированных условиях, для которых процессами фильтрации можно пренебречь в некотором диапазоне периодов.

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”. Для этого необходимы данные о строении водоносных систем, обоснование наличия в них контрастных по химическому и газовому составу вод, а также оценки количественных параметров диффузионно-конвективных процессов в водоносной системе и в стволе скважины (выводящем канале источника). Примеры построения таких моделей приводятся в [6, 8, 11].

Заключение. Наиболее важными результатами изучения гидрогеологических предвестников на Камчатке являются:

1 – обнаружение гидрогеологических предвестников, проявляющихся в течение месяцев – недель в аномальных изменениях уровня воды, минерального и газового состава подземных вод преимущественно перед местными землетрясениями с магнитудами $M \geq 6.6$ на расстояниях до 200-300 км от пунктов наблюдений, сопровождавшихся сотрясениями интенсивностью до $I=5-6$ баллов в районах наблюдательных пунктов;

2 – разработка и практическая реализация алгоритмов прогнозирования землетрясений с использованием выявленных закономерностей проявления гидрогеологических предвестников и выдачей регулярных заключений о сейсмической опасности по гидрогеологическим данным в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) и другие специализированные советы по прогнозу землетрясений;

3 – параметрическое описание отдельных видов гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников и создание моделей их формирования в отдельных скважинах с учетом комплекса локальных гидрогеологических условий, технического строения скважин, параметров землетрясений и систематизированных данных о проявлениях гидрогеологических предвестников.

Литература

1. 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.

2. 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.

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

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

5. Копылова Г.Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных равномерных 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.

6. Копылова (Гриц) Г.Н. Эффекты сейсмичности в режиме подземных вод (на примере Камчатского региона). Автореферат дисс. на соискание уч. ст. д. г.-м.н. по специальности 25.00.07 – гидрогеология. Петропавловск-Камчатский, 2010. - 36 с.

7. Копылова Г.Н., Смолина Н.Н. Изменения уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., $M_w=7.6$ // Вулканология и сейсмология. - 2010. - № 3. - С. 36-49.

8. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Аномальные изменения химического состава подземных вод в связи с Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w=6.9$) // Геофизические исследования. - 2012. - Т. 13. - № 1. - С. 39-49.

9. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w=7.8$ // Тихоокеанская геология. - 2012. - Т. 31. - № 5. - С. 104-114.

10. Копылова Г.Н. О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. - С. 382-386.

11. Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Ефстифеева А.С. Изменение насыщенности подземных вод вторичными минералами под влиянием сейсмичности (на примере Камчатки) // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: материалы Всеросс. совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2015. - С. 285-290.

12. 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.

13. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998-2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011 – 304 с.