

## Литература

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.

Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. № 94042027/25. Заявл. 23.11.94. Оpubл. 20.02.98. Бюл. № 5.

Прогностика. Терминология, вып. 92. М., «Наука», 1978. 32 с.

Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Изучение высокочастотного сейсмического шума по данным режимных наблюдений на Камчатке // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 3. С. 39–47.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 37–50.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124.

Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А. Специализированная станция регистрации сейсмических шумов «Начики» в системе геофизического мониторинга Камчатки // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 24–41.

Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // PEPI. 1990. V. 61. P. 84–98.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. V. 118. P. 8719–8721.

УДК 556.33:550.348

## ТРИГГЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ)

*Г.Н. Копылова, С.В. Болдина*

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

Рассматривается влияние землетрясений на изменение наблюдаемых в скважинах параметров режима подземных вод с возможностью оценки масштабов и значимости таких изменений при решении широкого круга задач гидрогеологии, геоэкологии и сейсмического прогнозирования. Основу работы составляют материалы специализированных наблюдений на скважинах территории Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка, проводимых Камчатским филиалом Геофизической службы РАН для поиска гидрогеологических предвестников землетрясений.

## Введение

Будем понимать под триггерным воздействием на подземные воды изменения их гидродинамических (уровни, дебиты, давление) и физико-химических (температура, химический состав воды) параметров, которые вызываются природными или техногенными факторами (триггерами). Такие изменения являются нехарактерными для общих закономерностей формирования режима подземных вод и проявляются в течение некоторого времени после воздействия триггера. Отсюда вытекает важное методическое следствие о необходимости изучения общих закономерностей режима наблюдательных скважин, источников и других объектов гидрогеологического мониторинга, так как оценка значимости эффекта от воздействия триггера может производиться только по отношению к фоновым изменениям их режима.

Если рассматривать сильное землетрясение как фактор, воздействующий на подземные воды, то можно выделить три его составляющие: 1 – процессы подготовки землетрясения; 2 – образование разрыва в очаге и изменение статического напряженного состояния водовмещающих пород; 3 – динамическая деформация водовмещающих пород и сотрясения ствола скважины при прохождении сейсмических волн. Следует отметить, что процессы подготовки землетрясений слабо изучены экспериментальными геодезическими, геофизическими и гидрогеологическими методами в плейстосейстовых зонах сильных землетрясений и теоретические представления о них основываются на ограниченном и не всегда однозначном материале эпизодических наблюдений различных видов предвестников. Значительно лучше изучены процессы перераспределения статического поля напряжений при образовании разрывов в очагах землетрясений и распространения сейсмических волн.

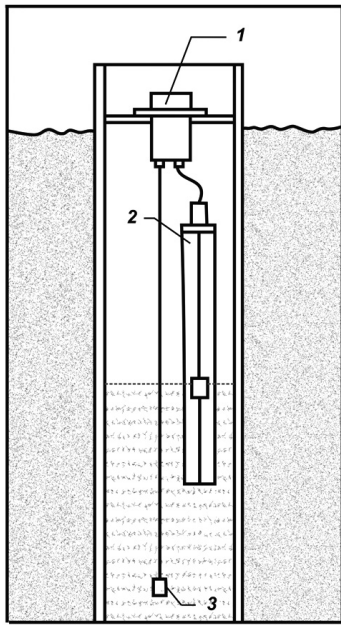
Воздействие землетрясений проявляется в гидрогеосейсмических вариациях параметров режима скважин и источников, которые являются основным объектом научного интереса при проведении специализированных наблюдений в сейсмоактивных регионах. В соответствии с указанными выше факторами сейсмического воздействия среди всей совокупности гидрогеосейсмических вариаций можно выделить: 1 – гидрогеологические предвестники, которые проявляются перед сильными землетрясениями преимущественно в плейстосейстовых зонах при возникновении асейсмических движений в области очага либо вследствие развития приповерхностной зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах; 2 – косейсмические скачки повышения или понижения уровня воды, амплитуды и направление которых находятся в соответствии с механизмом очага землетрясения и пространственным перераспределением статического поля напряжений в геологической среде (как правило, косейсмические скачки проявляются в скважинах, вскрывающих водоносные горизонты или трещинные зоны с напорными подземными водами); 3 – разнообразные ко- и постсейсмические эффекты вследствие динамического воздействия сейсмических волн на состояние системы скважина – водовмещающая порода и проявляющиеся в форме колебаний, повышений и понижений уровня воды различной продолжительности, в изменениях дебитов, температуры и химического состава подземной воды [Копылова, 2006б].

### Сеть скважин и методика наблюдений

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит наблюдения за режимом подземных вод на скважинах и источниках на территории Петро-

павловского геодинимического полигона с 1977 г. Цель работ – поиск гидрогеологических предвестников землетрясений и разработка методов их прогноза. Такие работы выполняются лабораториями гидросейсмологии и геофизических исследований. В лаборатории гидросейсмологии наблюдения проводятся на самоизливающихся скважинах и источниках на четырех станциях Пиначево, Морозная, Хлебозавод и Верхняя Паратунка (всего 7 скважин и четыре источника), расположенных в областях разгрузки термоминеральных подземных вод различных гидрогеохимических типов. Станции посещаются сотрудниками один раз в 3–6 дней. При этом производится отбор проб воды и растворенного газа, замеры дебита и температуры воды. Затем пробы анализируются в химической лаборатории и формируются временные ряды концентраций минеральных и газовых компонентов состава воды. В результате проведения таких многолетних наблюдений были обнаружены и описаны проявления гидрогеологических предвестников в изменениях химического состава воды и газа в связи с рядом землетрясений с магнитудами  $M$  порядка 7 и более, произошедших на расстояниях не более 200 км от наблюдательных пунктов, а также постсейсмические изменения дебитов, температуры и химического состава вод и газа [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004].

Лаборатория геофизических исследований проводит регистрацию уровня, температуры и электропроводности воды в двух скважинах Е-1 (глубина 665 м, в



**Рис. 1.** Схема установки измерительного комплекса Кедр-ДМ-У и его компонентов в скважине.

1 – БСИ 300 – блок сбора информации, включающий датчики атмосферного давления и температуры воздуха; 2 – ультразвуковой датчик уровня воды; 3 – глубинный зонд, оборудованный датчиками температуры и электропроводности воды

интервале 625–647 м выполнена перфорация обсадной колонны, уровень на глубине 27 м ниже оголовка) и ЮЗ-5 (глубина 800 м, в диапазоне глубин 310–800 м обсадка отсутствует, уровень на глубине 1 м). Данные о строении скважин и локальных гидрогеологических условиях приводятся в [Копылова, 2001, 2006], а также на сайте КФ ГС РАН по адресам <http://emsd.ru/lgi/places/e1> и <http://emsd.ru/lgi/places/uz5>.

В обеих скважинах наблюдения проводятся с использованием аппаратного комплекса Кедр-ДМ-У (ООО Полином, г. Хабаровск, [Калинов и др., 2012]) с телеметрической передачей данных в КФ ГС РАН по каналам сотовой связи. В состав Кедр-ДМ-У входят высокочувствительный ультразвуковой датчик уровня воды, позволяющий регистрировать изменения уровня с точностью  $\pm 0,1$  мм, и глубинный зонд для измерений электропроводности и температуры подземной воды. В скв. ЮЗ-5 зонд находится на глубине 97 м ниже оголовка, в скв. Е-1 – на глубине 20 м. Датчики атмосферного давления и температуры воздуха входят в состав блока регистрации БСИ 300, который устанавливается над оголовком скважины. Схема установки измерительного комплекса на скважинах приводится на рис. 1. Измерения гидрогеологических и метеорологических параметров проводятся с интервалом 5 минут. Передача данных в КФ ГС РАН осуществляется один раз в час, обработка данных проводится ежедневно. Результаты обработки в

виде графиков временных рядов изменений уровня воды (исходных и очищенных от влияния приливных и баровариаций) представляются на сайте КФ ГС РАН по адресу <http://emsd.ru/lgi/observations>.

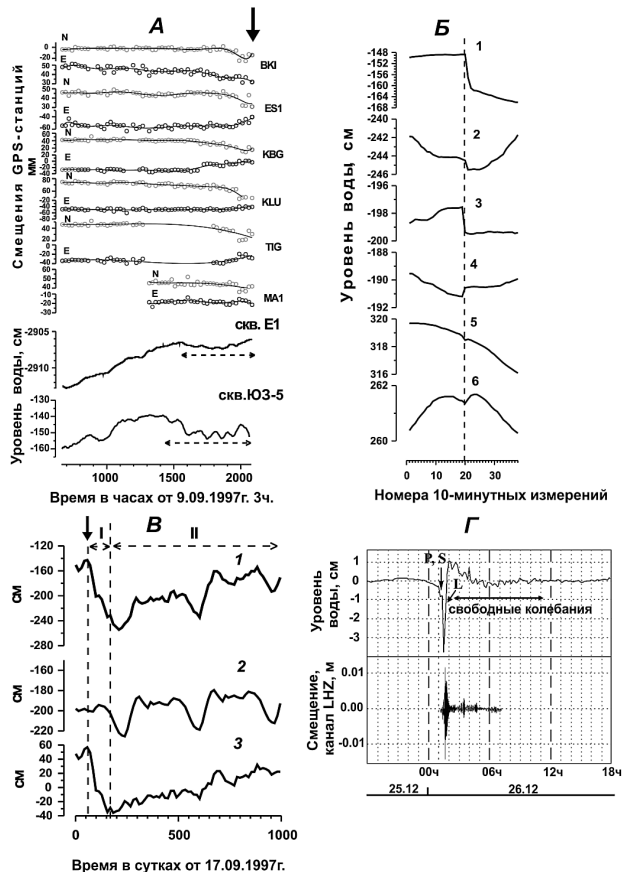
Методики обработки данных уровневых наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций, включая гидрогеодинамические предвестники землетрясений, приводятся в [Копылова и др., 2007] и в других публикациях авторов (см. <http://emsd.ru/lgi/result/hydro>). С ее использованием гидрогеосейсмические вариации в изменениях уровня, температуры и электропроводности воды могут выделяться в режиме близком к реальному времени с задержкой между измерением параметров и отображением временных рядов обработанных уровневых данных на мониторе оператора не более одних суток.

С использованием представленной системы наблюдений получены многочисленные данные по изменениям параметров подземных вод при ощутимых землетрясениях 1977–2013 гг. с интенсивностью сотрясений от 3 до 5–6 баллов по шкале MSK-64.

## Гидрогеосейсмические вариации

**Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г.,  $M = 7,8$ .** При Кроноцком землетрясении (КЗ) впервые были зарегистрированы изменения уровня в скв. ЮЗ-5, со-

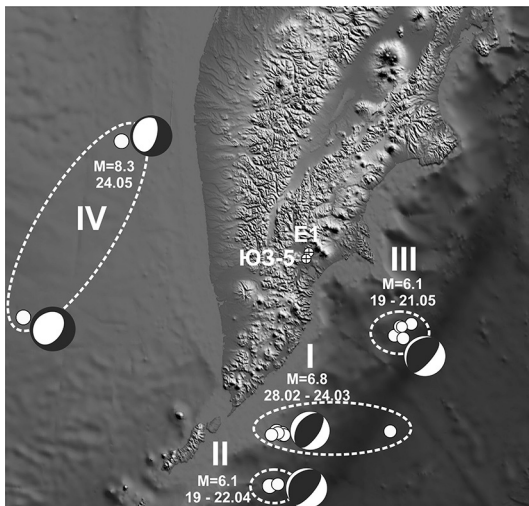
**Рис. 2.** Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скв. ЮЗ-5 в связи с Кроноцким землетрясением (КЗ). *А* – гидрогеодинамический предвестник (показан пунктирной линией) приводится в сопоставлении с вариациями уровня воды в скв. Е-1 и перемещениями GPS-станций локальной сети КАМNET. *Б* – косейсмические скачки уровня воды. *В* – понижение уровня воды после КЗ в течение 3,5 мес. (I) и его последующее восстановление в течение двух лет (II); 1 – данные наблюдений, 2 – выделенные годовая сезонность и линейный тренд, 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда. *Г* – колебания уровня воды в результате Суматранского землетрясения 26.12.2004 г.,  $M = 9$ , гипоцентрального расстояния  $R = 8250$  км; приводятся в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, с/ст. Петропавловск [Копылова, 2006а]



ответствующие всем трем указанным выше факторам сейсмического воздействия (рис. 2). Гидрогеодинамический предвестник проявился в синхронных понижениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 с амплитудами 11 и 1 см в течение трех недель (рис. 2, А). По времени он соответствовал аномальным перемещениям некоторых GPS станций локальной сети и, по-видимому, был вызван квазиупругой деформацией водовмещающих пород при активизации преимущественно асейсмических движений в области будущего очага. В момент КЗ был зарегистрирован косейсмический скачек понижения уровня с амплитудой 12 см в течение времени не более 10–13 минут (рис. 2, Б). Наблюдались также длительные постсейсмические изменения уровня воды вследствие воздействия сейсмических волн – понижение уровня с амплитудой около 1 м в течение трех месяцев и последующее двухлетнее восстановление (рис. 2, В).

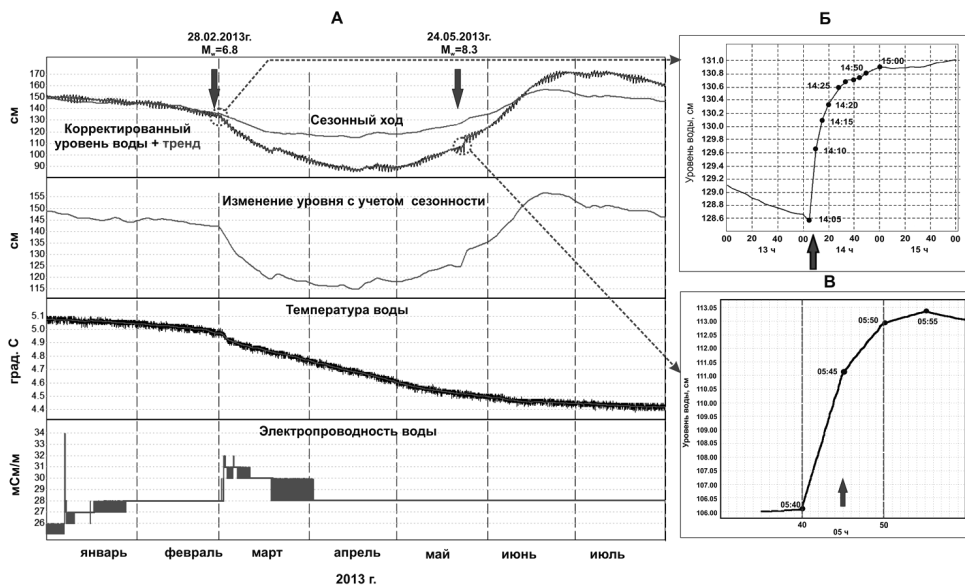
**Гидрогеосейсмические вариации, зарегистрированные в связи с сильными землетрясениями 2013 г.** В 2013 г. на Камчатке произошла серия сильных землетрясений с магнитудами 6 и более (рис. 3). В акватории Тихого океана произошли три роя коровых землетрясений с максимальными магнитудами от 6,1 до 6,8. 24 мая в Охотском море произошло мантийное землетрясение с магнитудой 8,3. В результате этих землетрясений были зарегистрированы разнообразные изменения уровня и физико-химических параметров подземных вод в режиме близком к реальному времени.

На рис. 4 показаны изменения уровня, температуры и электропроводности воды в скв. ЮЗ-5 при двух наиболее сильных землетрясениях 2013 г. 28 февраля,  $M = 6,8$  и 24 мая,  $M = 8,3$  (рис. 3). После вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля в течение 45 минут происходило повышение уровня с амплитудой 2,2 см (рис. 4, Б) и 24 мая наблюдалось повышение уровня в течение 20 минут с амплитудой 7,3 см (рис. 4, В). Такие эффекты могли быть вызваны наложением косейсмических скачков повышения давления подземной воды вследствие объемного сжатия водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений и импульсного повышения порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн [Болдина, Копылова, 2013].



**Рис. 3.** Схема эпицентров сильных землетрясений 2013 г. с указанием величин максимальных магнитуд в выделенных четырех группах сейсмических событий (I-IV)

После землетрясения 28 февраля в среднечасовых изменениях уровня воды проявилось его интенсивное понижение (рис. 4, А), которое развивалось до середины апреля. Амплитуда понижения уровня в течение 1,5 месяцев составила 35 см. Следует отметить, что эффект постсейсмического понижения уровня воды наблюдался ранее в скв. ЮЗ-5 лишь однажды, после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г.,  $M_w = 7,8$  (рис. 2, В). В случае КЗ понижение уровня с ам-



**Рис. 4.** Изменения уровня, температуры и электропроводности воды в скважине ЮЗ-5 с 1 января по 1 августа 2013 г., включающие ко- и постсейсмические вариации вследствие землетрясений 28 февраля и 24 мая 2013 г. (показаны стрелками)

плитудой около 1 м продолжалось три месяца [Копылова, 2006а]. После землетрясения 24 мая проявилось интенсивное повышение уровня воды (рис. 4, А), которое развивалось до конца июня. Амплитуда повышения уровня составила 24 см.

В среднечасовых изменениях уровня воды, очищенных от влияния атмосферного давления, земных приливов и сезонных вариаций (рис. 4, А), не обнаружены аномалии в диапазоне периодов суток – десятки суток перед обоими землетрясениями. Это указывает на отсутствие значимых проявлений процессов подготовки этих сейсмических событий в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 в течение суток – первых месяцев перед землетрясениями 28 февраля и 24 мая 2013 г.

На рис. 4, А представлены изменения температуры и электропроводности воды в скв. ЮЗ-5. После землетрясения 28 февраля 2013 г. произошло заметное понижение температуры воды и повышение электропроводности, которые можно отнести к постсейсмическим вариациям в режиме подземных вод. Резкое повышение электропроводности воды с амплитудой 6 мСм/м было зарегистрировано 7 января, то есть примерно за 8 недель до землетрясения. Возможное значение этого эффекта для прогноза землетрясений можно будет оценить по результатам дальнейших наблюдений.

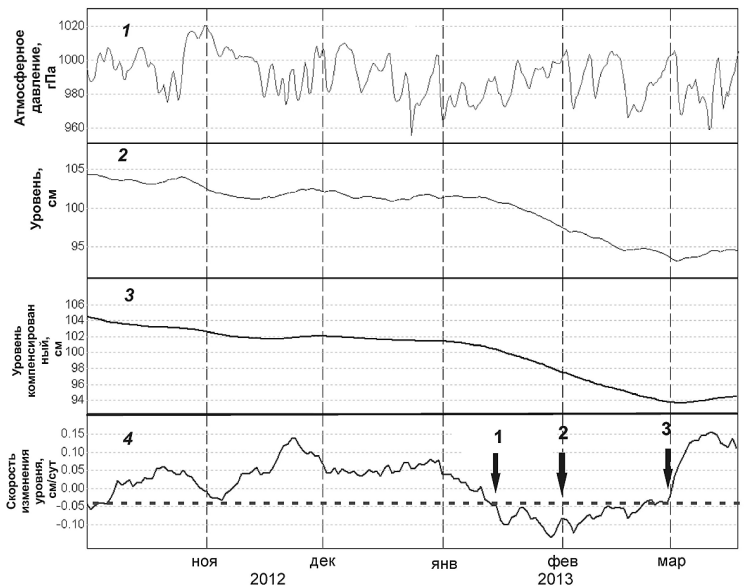
Гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью, проявляющийся в скв. Е-1, ранее был описан в [Копылова, 2001, 2008; Копылова, Сизова, 2012]. Важными особенностями этого вида предвестника являются:

- относительно регулярная повторяемость предвестника перед землетрясениями с величинами магнитуд  $M \geq 5,0$  на расстояниях до 350 км (более 70% случаев), что позволяет использовать его для прогнозирования сильных местных землетрясений;

– увеличение связи предвестника и землетрясений с ростом величины их магнитуды [Копылова, Сизова, 2012], указывающее на то, что перед более сильными сейсмическими событиями предвестник в изменениях уровня воды в скв. Е-1 проявляется с большей регулярностью. С использованием этого вида предвестника по текущим данным уровневых наблюдений на скв. Е-1 осуществляется оценка опасности возникновения сильных землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского с предоставлением прогнозных заключений в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС).

Изменения уровня воды в скв. Е-1 в период землетрясения 28 февраля: понижение с повышенной скоростью в течение 44 сут перед землетрясением и его повышение с амплитудой около 2 см после землетрясения (рис. 5), является типичным для периодов возникновения сильных ( $M \geq 6,6$ ) местных землетрясений на расстояниях до 300 км [Копылова, 2001]. В соответствии с установленной ранее закономерностью в скв. Е-1 было зарегистрировано последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмическое повышение в изменениях уровня воды.

В прогнозном заключении от 1 февраля 2013 г., поданном в КФ РЭС, указывалось, что «в течение времени 1-2 месяца повышена вероятность возникновения землетрясения с  $M \geq 5,0$  на расстоянии до 350 км от скважины». В заключении также были приведены оценки надежности прогноза для землетрясений с различными величинами магнитуды, основывающиеся на результатах ретроспективного анализа проявлений гидрогеодинамического предвестника за период многолетних наблю-



**Рис. 5.** Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1 октября 2012 по 18 марта 2013 г. 1 и 2 – данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 – среднесуточные изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, 4 – суточная скорость изменения уровня воды с учетом скорости нисходящего тренда. На графике тремя стрелками показаны: 1 – 16 января 2013 г., начало проявления гидрогеодинамического предвестника; 2 – 1 февраля 2013 г., дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС; 3 – 28 февраля 2013 г., дата землетрясения. Горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды

дений [Копылова, Сизова, 2012]: «вероятность события с  $M \geq 5,0$   $P = 0,45$ , прогнозная эффективность предвестника  $I = 1,4$ ; вероятность события с  $M \geq 5,9$   $P = 0,73$ , прогнозная эффективность предвестника  $I = 2,2$ ».

Произошедшее 28 февраля землетрясение с  $M = 6,8$  на расстоянии 290 км от скважины соответствовало прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, времени и местоположению. Поэтому прогноз, поданный 1 февраля в КФ РЭС, является успешным. Поданный прогноз также является вероятностным, так как сопровождался оценками вероятности его реализации в отношении событий с различными величинами магнитуды. Это стало возможным благодаря тому, что была выполнена систематизация данных о проявлении гидрогеодинамического предвестника для периода многолетних (1987 г. – настоящее время) наблюдений на скв. Е-1 и тем самым было обеспечено его параметрическое описание [Копылова, 2001, 2008; Копылова, Сизова, 2012].

По данным регистрации физико-химических параметров подземных вод в скв. Е-1 с использованием глубинного зонда было обнаружено слабое повышение электропроводности воды с амплитудой 1–2 мСм/м в течение двух суток после землетрясения. В изменениях температуры воды гидрогеосейсмические вариации не проявлялись.

### Заключение

1. Созданная в КФ ГС РАН система наблюдений на скважинах позволяет диагностировать гидрогеосейсмические вариации в изменениях химического состава воды, уровня и физико-химических параметров подземных вод в режиме близком к реальному времени. Наличие таких данных позволяет ставить вопрос об экспериментальном изучении триггерного воздействия сейсмичности на подземные воды на Камчатке. Методология изучения триггерного воздействия сейсмичности на подземные воды должна включать систематизацию и типизацию гидрогео-сейсмических вариаций параметров подземных вод в сопоставлении с данными о вызвавших их землетрясениях и с учетом локальных гидрогеологических условий.

2. По данным равномерных наблюдений в скв. Е-1 осуществлен успешный прогноз землетрясения 28 февраля 2013 г.,  $M = 6,8$  со временем упреждения 4 недели. Прогноз сопровождался вероятностной оценкой его реализации, основанной на ретроспективном изучении связи гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды с произошедшими землетрясениями по данным многолетних наблюдений и его параметрическом описании.

### Литература

*Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г.,  $M = 6,8$  // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 430–434.

*Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др.* Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92–99.

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

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

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

*Копылова Г.Н.* Оценка сейсмопрогностической информативности данных равномерных наблюдений на скважине Е-1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24–28.

*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., 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.

*Копылова Г.Н., Сизова Е.Г.* О предвестнике землетрясений, проявляющемся в изменениях уровня воды в скважине Е-1, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы: Матер. конф., посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116–125.

*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.

УДК 551.24 + 550.34

## **ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ В ЗОНЕ ПРИМОРСКОГО РАЗЛОМА**

***В.В. Ружич<sup>1</sup>, Е.Н. Черных<sup>1</sup>, В.Б. Савельева<sup>1</sup>,  
Д.В. Павлов<sup>2</sup>, А.А. Остапчук<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Институт динамики геосфер РАН, Москва

Рассмотрены возможности и результаты применения геологических методов и физических экспериментов на природных геоструктурных объектах для изучения явлений, связанных с процессами контактного трения в зонах разломов. На основании недавних исследований, проведенных в процессе натуральных физических экспериментов со взрывными и силовыми воздействиями на выбранный сегмент зоны Приморского разлома, обсуждаются причины и механизмы изменения режимов излучения волновых колебаний сейсмического диапазона. Также рассмотрены подходы к детальному изучению зеркал скольжения в виде образцов горных пород, отобранных из глубинных эксгумированных сегментов зон разломов со следами интенсивной тектонической переработки, включая тончайшее истира-