



УДК 556.33:550.348

Г. Н. Копылова, Е. Г. Сизова

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

Вариации уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка, вызванные сейсмическим событием 28 февраля 2013 г., $M = 6,9$

Представлены данные по изменениям уровня, температуры и электропроводности воды в пьезометрических скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка, зарегистрированные в период землетрясения 28 февраля 2013 г., $M = 6,9$, произошедшем на эпицентральной дистанции 290 км. В изменениях уровня воды в скважине Е-1 последовательно проявились гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью и постсейсмический эффект. Предвестник был выявлен в режиме близком к реальному времени. На его основе был составлен прогноз землетрясения и передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности риска 1 февраля 2013 г. Прогноз сопровождался вероятностными оценками его реализации в отношении землетрясений с различными величинами магнитуды.

Введение

28 февраля 2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки на глубине около 50 км произошло землетрясение с магнитудой 6,9, которое сопровождалось сотрясениями интенсивностью 4–5 баллов в г. Петропавловске-Камчатском, расположенном на эпицентральной дистанции 290 км. Это землетрясение было первым из серии землетрясений в этом районе, произошедших 28 февраля — 9 марта 2013 г., наиболее сильные из которых имели магнитуды $M = 6,1–6,8$.

Сейсмические события такой интенсивности не происходили в относительной близости от г. Петропавловска-Камчатского — столицы Камчатского края, в течение 14-ти последних лет после землетрясения 8 марта 1999 г., $M = 7,0$. Поэтому анализ материалов различных видов наблюдений на предмет выделения эффектов, предшествующих и сопутствующих произошедшему сейсмическому событию, представляет большой научный интерес.

В связи с землетрясением 28 февраля 2013 г. в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 с использованием аппаратурного комплекса Кедр ДМ-У (ООО Полином, г. Хабаровск), оборудованного прецизионными датчиками уровня, атмосферного давления, температуры и электропроводности воды, были зарегистрированы разнообразными вариации параметров режима подземных вод, вызванные воздействием сейсмических волн. Перед землетрясением в скважине Е-1 развивалось понижение уровня воды с повышенной скоростью, которое рассматривается как предвестник (признак подготовки) сильного землетрясения. Прогнозное заключение о возможности сильного землетрясения с вероятностными оцен-

ками надёжности прогноза по ретроспективным данным было подано 1 февраля 2013 г. в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС).

В докладе рассматриваются вариации уровня воды и других наблюдаемых параметров подземных вод, вызванные землетрясением 28 февраля 2013 г., а также ситуация с прогнозированием этого сейсмического события по данным уровнемерных наблюдений на скважине Е-1.

Система наблюдений

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит регистрацию уровня, температуры и электропроводности воды в двух глубоких скважинах Е-1 (глубина 665 м, уровень на глубине 27 м ниже оголовка) и ЮЗ-5 (глубина 800 м, уровень на глубине 1 м). Данные о строении скважин и локальных гидрогеологических условиях приводятся в [2–3], а также на сайте РАН.^{1,2}

В скв. Е-1 в интервале 625–647 м выполнена перфорация обсадной колонны. В скв. ЮЗ-5 в диапазоне глубин 310–800 м обсадка отсутствует, и ствол скважины связан напрямую с водовмещающими породами. Скважины расположены на расстоянии около 290 км от эпицентра землетрясения 28 февраля 2013 г. (рис. 1).

В обеих скважинах наблюдения проводятся с использованием аппаратурного комплекса Кедр-ДМ-У с телеметрической передачей данных в КФ ГС РАН по каналам сотовой связи общего пользования [1]. В состав Кедр-ДМ-У входят высокочувствительный

¹<http://emsd.ru/lgi/places/e1>

²<http://emsd.ru/lgi/places/uz5>

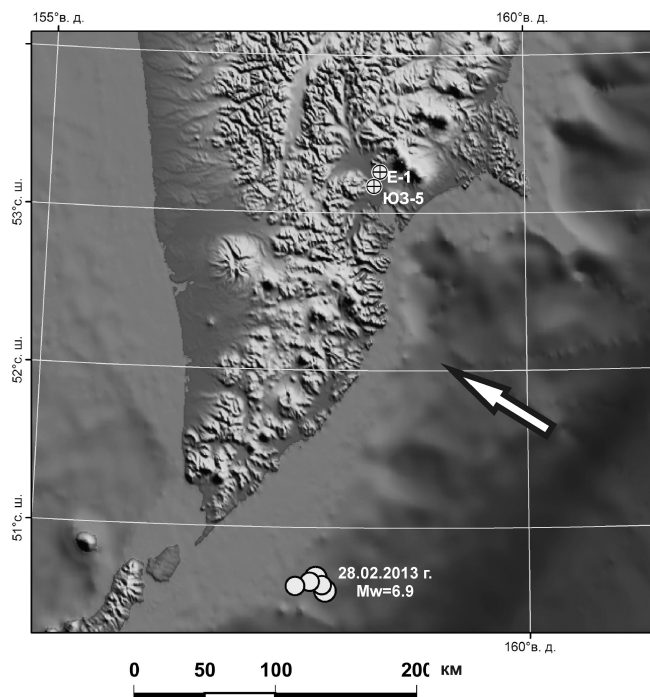


Рис. 1. Схема расположения скважин Е-1 и ЮЗ-5, эпицентров землетрясения 28 февраля 2013 г. и его сильнейших афтершоков. Стрелкой показано направление движения Тихоокеанской океанической плиты.

ультразвуковой датчик уровня воды, позволяющий регистрировать изменения уровня воды 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 ниже уровня воды. 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. 2.

Измерения гидрогеологических и метеорологических параметров проводятся с интервалом 5 минут. Передача данных в КФ ГС РАН осуществляется один раз в час, обработка данных проводится в лаборатории геофизических исследований КФ ГС РАН ежедневно по будним дням. Результаты обработки в виде графиков временных рядов изменений уровня воды (исходных и очищенных от влияния факторов-помех) представляются на сайте КФ ГС РАН.³ Графики обновляются ежедневно.

Описание методики обработки данных равномерных наблюдений для выделения вариаций уровня воды, связанных с влиянием сейсмичности (гидрогеосейсмических вариаций), приводится в [5], а также в других публикациях авторов настоящего доклада.⁴

Используемая система наблюдений позволяет выделять гидрогеосейсмические вариации в измене-

³<http://emsd.ru/lgi/observations>

⁴<http://emsd.ru/lgi/result/hydro>

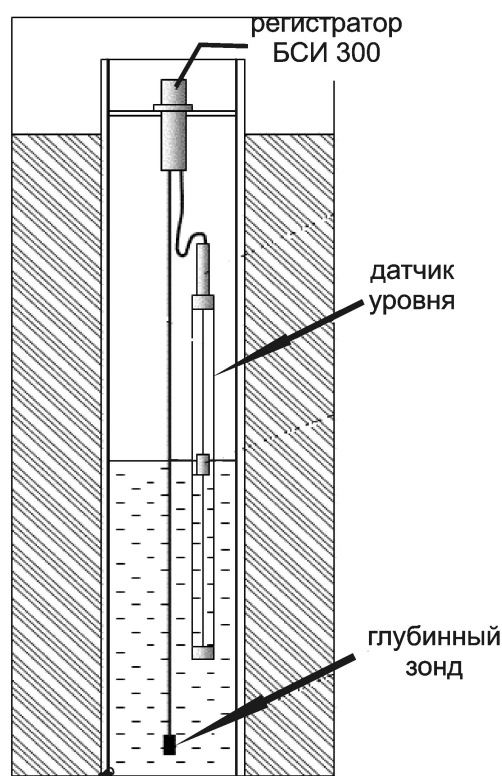


Рис. 2. Схема установки измерительного комплекса Кедр-ДМ-У и его компонентов в скважине. БСИ 300 — блок сбора информации, включающий датчики атмосферного давления и температуры воздуха.

ниях уровня, температуры и электропроводности подземной воды в режиме близком к реальному времени с задержкой между измерением параметров и отображением временных рядов обработанных равномерных данных на мониторе оператора от часов — одних суток до 2,5–3 суток. Максимальная задержка между получением данных и их обработкой и визуализацией происходит по понедельникам.

Гидрогеосейсмические вариации уровня, температуры и электропроводности воды, зарегистрированные в связи с землетрясением 28 февраля 2013 г.

В скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн (14:07) в течение 45 минут происходило повышение уровня с амплитудой 2,2 см (рис. 3). Мы полагаем, что такой эффект мог быть вызван наложением косейсмического скачка повышения уровня вследствие изменения напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения (их объемного сжатия) и кратковременного повышении порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн. Более обоснованные выводы относительно механизма формирования наблюдаемого эффекта в изменениях уровня воды будут сделаны по результатам моделирования.

После землетрясения в среднечасовых изменениях уровня воды проявилось его интенсивное по-

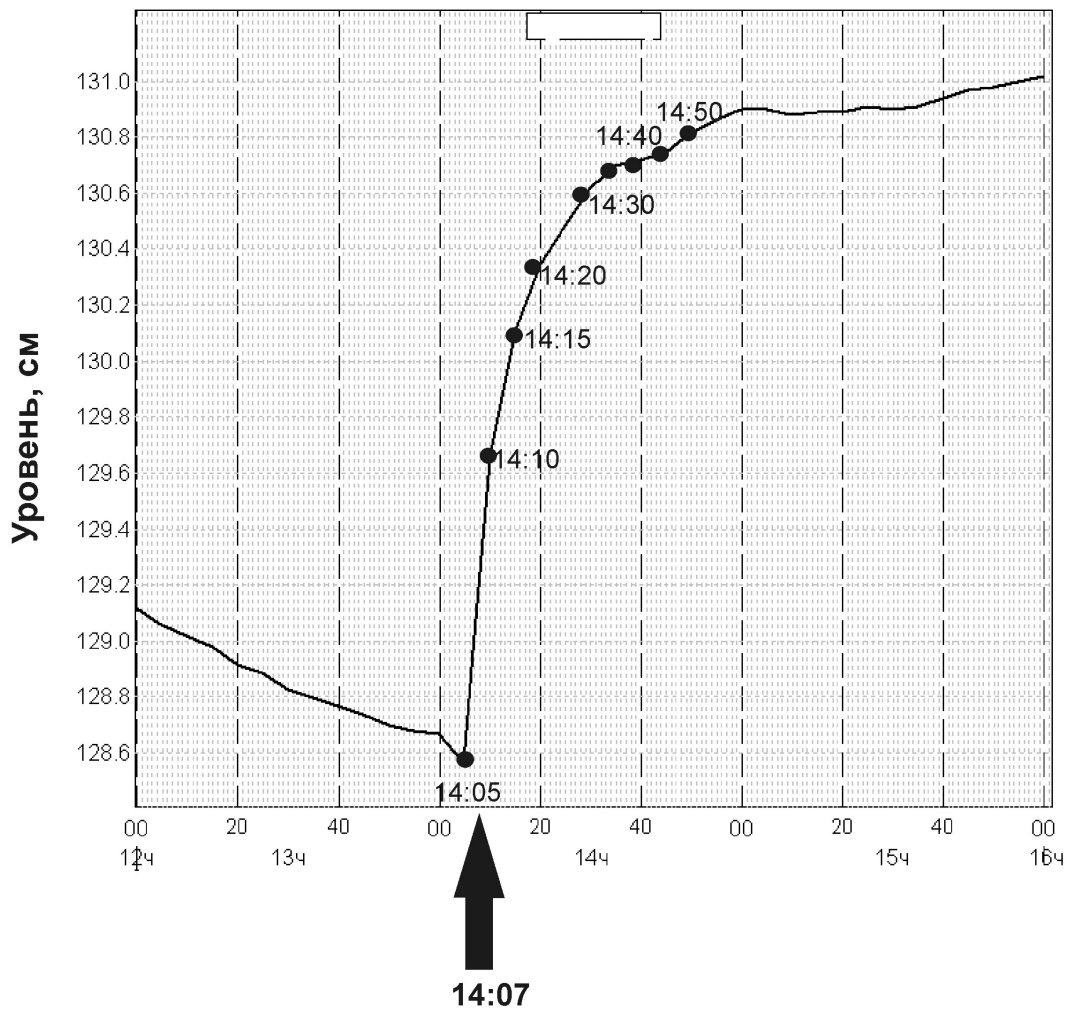


Рис. 3. Кратковременное повышение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля 2013 г. (показано стрелкой).

нижение (рис. 4), 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., $M_w = 7,8$, произошедшего на эпицентральной расстоянии 310 км от скважины ЮЗ-5. В случае Кроноцкого землетрясения понижение уровня с амплитудой около 1 м продолжалось три месяца [3].

В среднечасовых изменениях уровня воды, максимально очищенных от влияния основных факторов-помех, к которым относятся барометрические, приливные вариации и сезонный тренд (график 4 на рис. 4), аномалии в диапазоне периодов суток – десятки суток с амплитудами не менее 5 см перед землетрясением 28 февраля не фиксировались. Это указывает на отсутствие значимого проявления процессов подготовки этого сейсмического события в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 в течение суток – первых месяцев перед землетрясением.

На рис. 5 представлены изменения температуры и электропроводности воды в скв. ЮЗ-5. После землетрясения 28 февраля 2013 г. произошло заметное понижение температуры воды (график 1) и повышение электропроводности (график 2). Эти изменения можно отнести к постсейсмическим вариациям в режиме подземных вод. Резкое повышение электропроводности воды с амплитудой 6 мСм/м было зарегистрировано 7 января, т. е. примерно за 8 недель до землетрясения. Возможное значение этого эффекта для прогноза землетрясений можно будет оценить по результатам дальнейших наблюдений.

Изменение уровня воды в скважине 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. 6), является типичным для периодов возникновения сильных ($M \geq 6,6$) местных землетрясений на расстояниях до 300 км [2]. В соответствии с известной закономерностью, установ-

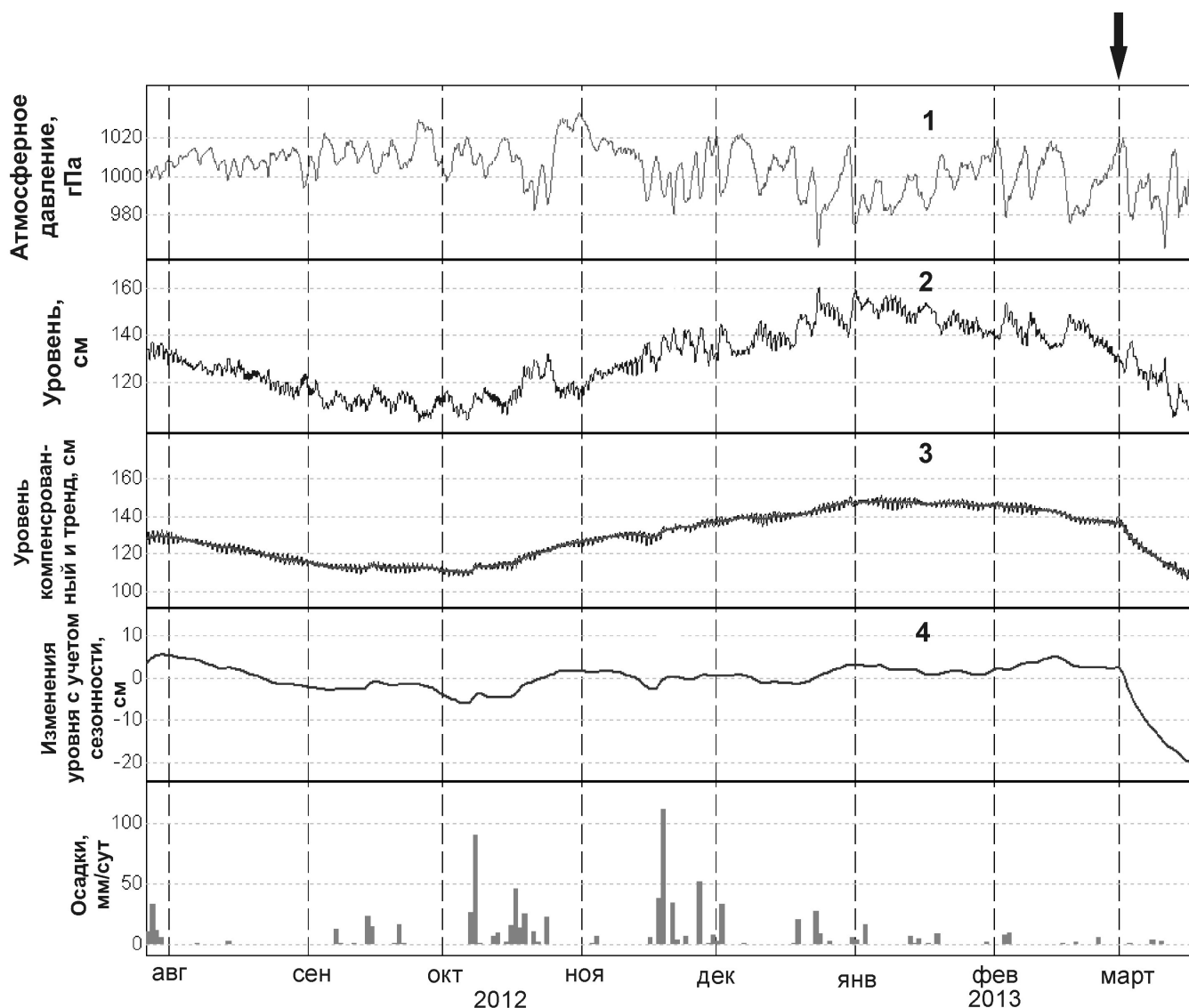


Рис. 4. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 27 июля 2012 г. по 17 марта 2013 г., включающие длительное постсейсмическое понижение после землетрясения 28 февраля 2013 г. (момент землетрясения показан стрелкой): 1 и 2 — данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 — среднечасовые изменения уровня воды с компенсированными баровариациями и выделенным трендом, 4 — среднечасовые изменения уровня воды, очищенные от барометрических, приливных вариаций и сезонного тренда.

ленной по результатам многолетних уровнемерных наблюдений, в скважине Е-1 было зарегистрировано последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмическое повышение в изменениях уровня воды. Гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью ранее был описан в [2, 4, 6–7]. 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 [6], ука-

зывающее 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 уровнемерных 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).

По данным регистрации физико-химических параметров подземных вод в скв. Е-1 с использованием глубинного зонда было обнаружено слабое по-

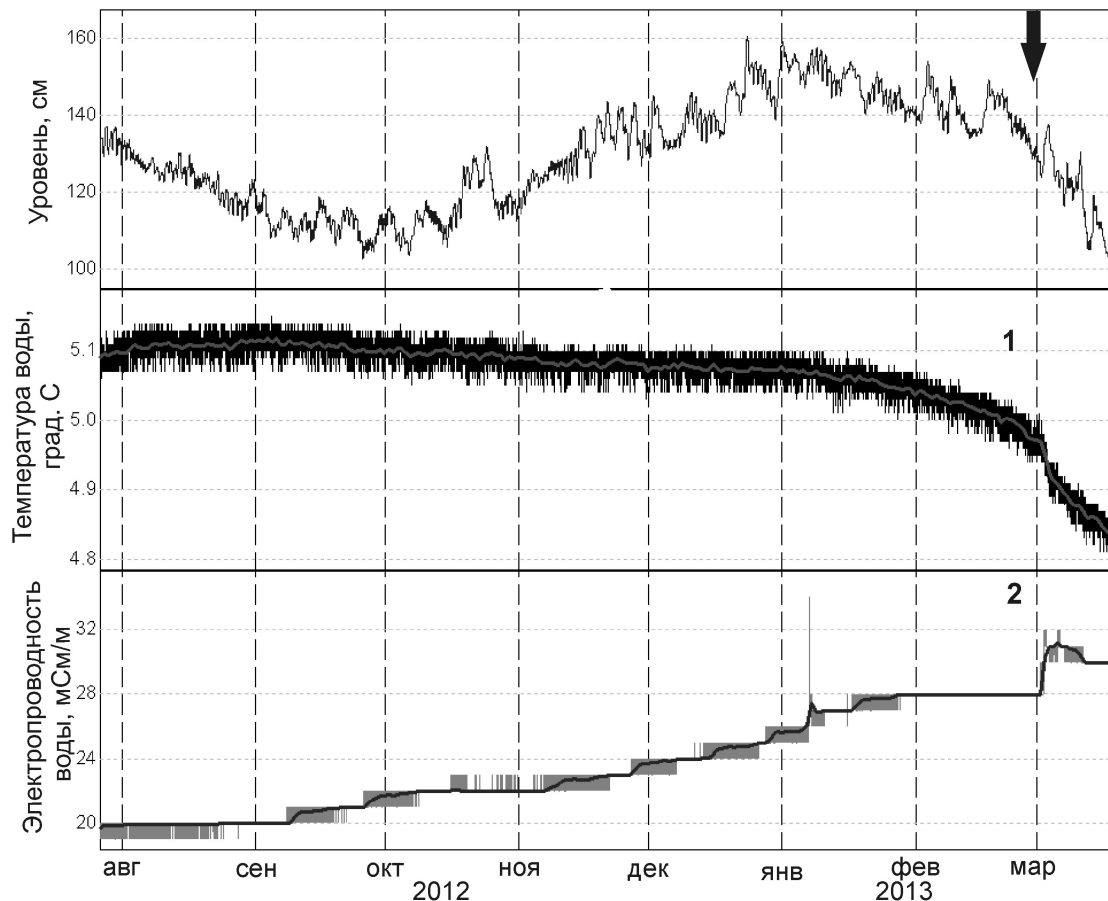


Рис. 5. Изменения температуры (1) и электропроводности (2) воды в скважине ЮЗ-5 на глубине 97 м с 27 июля 2012 г. по 17 марта 2013 г., включающие постсейсмические вариации после землетрясения 28 февраля 2013 г. (момент землетрясения показан стрелкой).

вышение электропроводности воды с амплитудой 1–2 мСм/м в течение двух суток после землетрясения. В изменениях температуры воды гидрогеосейсмические вариации не проявлялись.

Прогнозирование землетрясения 28 февраля 2013 г. по данным равномерных наблюдений

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 надёжности прогноза для землетрясений с различными величинами магнитуды, основывающиеся на результатах ретроспективного анализа проявлений гидрогеодинамического предвестника за период многолетних наблюдений [6]: «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 $M = 6,9$ на расстоянии 290 км от скважины соответствовало прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, по времени и по местоположению. Поэтому

мы считаем прогноз, поданный 1 февраля в КФ РЭС, успешным. Поданный прогноз также является вероятностным, т. к. 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 [2, 4, 6–7].

Заключение

Пример землетрясения 28 февраля 2013 г. показал:

- используемая в КФ ГС РАН система специализированных наблюдений за режимом подземных вод в пьезометрических скважинах позволяет диагностировать различные типы гидрогеосейсмических вариаций уровня, температуры и электропроводности воды, в т. ч. гидрогеодинамические предвестники сильных землетрясений, в режиме близком к реальному времени;
- предложенный ранее в [2, 4, 6] метод вероятностного среднесрочного прогноза времени сильных

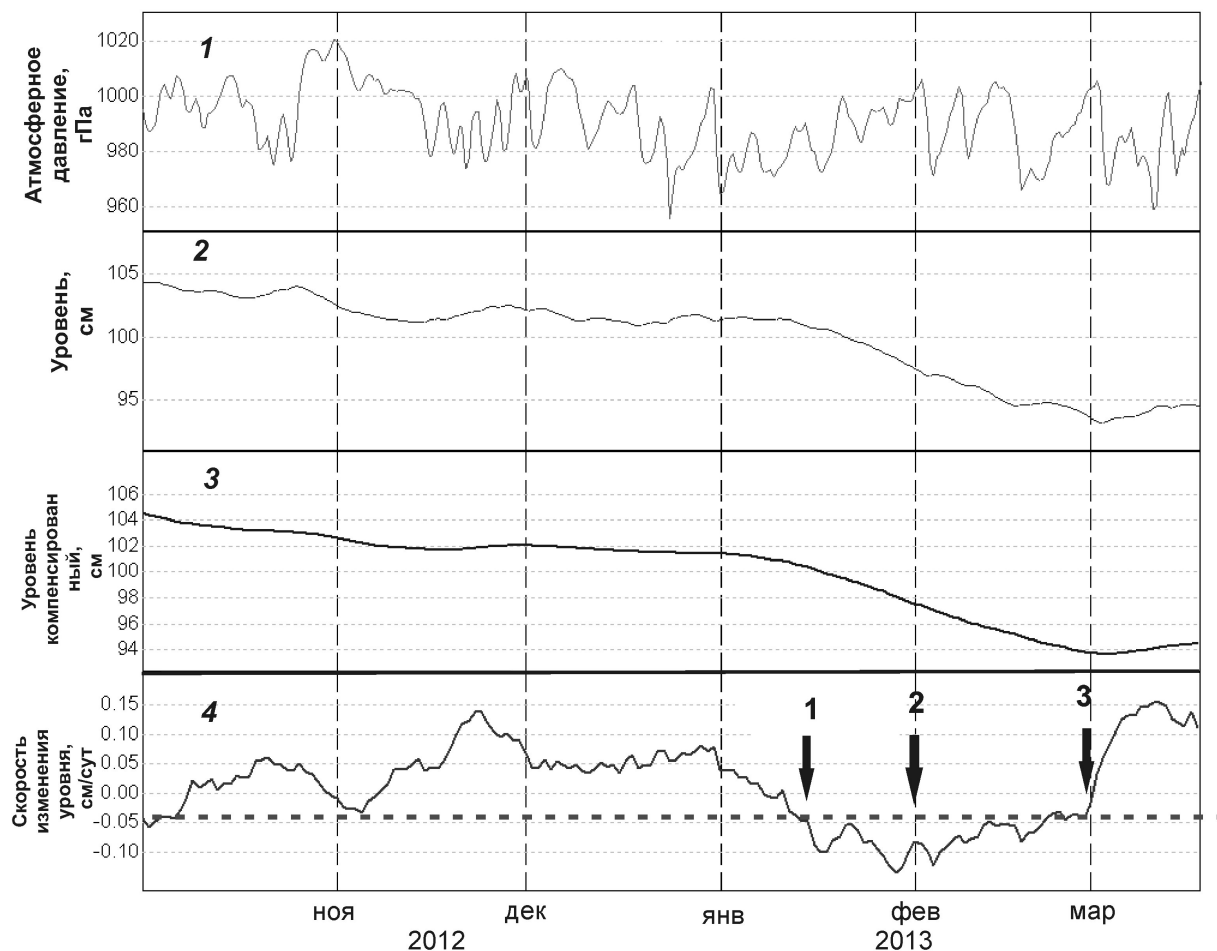


Рис. 6. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1 октября 2012 г. по 18 марта 2013 г., включающие проявление гидрогеодинамического предвестника и постсейсмическое повышение в связи с землетрясением 28 февраля 2013 г.: 1 и 2 — данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 — среднесуточные изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, 4 — суточная скорость изменения уровня воды с учётом скорости нисходящего тренда. На графике 4 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.

землетрясений Камчатки с заблаговременностью месяцы – недели, основывающийся на данных уровнемерных наблюдений на скважине Е-1, продемонстрировал свою практическую полезность в системе прогнозирования сейсмической опасности в Камчатском крае.

Список литературы

1. Калинов Г. А., Лысаков А. В., Римлянд В. И. и др. Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92–99.
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. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, 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.
5. 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.
6. 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. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116–125.
7. Копылова Г. Н., Болдина С. В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.