

УДК 556.3:550.34

ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ: 1977–2017 гг.

© 2019 г. Г. Н. Копылова*, С. В. Болдина

*Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9*

**e-mail: gala@emsd.ru*

Поступила в редакцию 07.02.2018 г.

Рассматриваются основные этапы организации и технического развития системы специализированных наблюдений за физико-химическими параметрами подземных вод на сети скважин и источников на территории Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка. Основное внимание уделяется описанию гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников камчатских землетрясений ($M_w = 6.6–7.8$), проявляющихся в течение недель-месяцев до сейсмических событий в аномальных изменениях химического состава и уровней подземных вод, и их использованию в практике работы специализированных советов по прогнозу землетрясений. Показано, что созданная в КФ ФИЦ ЕГС РАН система автоматизированных наблюдений за параметрами подземных вод в скважинах позволяет диагностировать гидрогеодинамические предвестники в изменениях уровня воды в режиме близком к реальному времени и давать, в отдельных случаях, количественные оценки величин пред- и косейсмической деформации водовмещающих пород, что может найти применение при проведении геофизического мониторинга и среднесрочном прогнозировании времени сильных землетрясений в Камчатском регионе.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение, скважина, уровень воды, химический состав подземной воды, предвестник, прогнозирование землетрясений.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>

ВВЕДЕНИЕ

Со второй половины XX в. развивается гидрогеосейсмология – новое научное направление на стыке гидрогеологии и сейсмологии [Киссин и др., 1982]. Содержание гидрогеосейсмологии составляет изучение влияния на подземные воды сейсмичности как совокупности отдельных землетрясений и процессов их подготовки; поиск гидрогеологических предвестников землетрясений и разработка на их основе методов сейсмического прогнозирования.

Зарождение гидрогеосейсмологии было связано с принятием в ряде ведущих стран мира (в бывшем СССР, США, Китае и др.) национальных программ по прогнозу землетрясений, в которые включались наблюдения за параметрами подземных вод [Рикитаке, 1979]. О необходимости проведения наблюдений за параметрами подземных вод для поиска предвестников землетрясений в сейсмоактивных регионах также упоминалось в ряде научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, начиная с пионерской работы [Уломов, Мавашев, 1967].

Реализация целей гидрогеосейсмологии предполагает решение совокупности технических, научно-методических и прикладных задач [Киссин и др., 1982; Копылова, 2010]:

- создание сетей специализированных гидрогеологических наблюдений на скважинах и источниках, получение временных рядов данных наблюдений за физико-химическими параметрами подземных вод; выделение и систематизация гидрогеологических эффектов, вызванных землетрясениями;

- изучение закономерностей проявления и процессов формирования эффектов сейсмичности в различных геотехнических и гидрогеологических системах, в частности, в системах “скважина – водовмещающая порода”, “подземная вода – горная порода” и др.;

- разработка методов прогноза сильных землетрясений с использованием данных гидрогеологических наблюдений.

Изменения физико-химических параметров подземных вод, вызванных землетрясениями, или *гидрогеосейсмические вариации* [Копылова, 1992], являются главным объектом

гидрогеосейсмологии. По времени проявления относительно момента землетрясения гидрогеосейсмические вариации разделяются на гидрогеологические предвестники, ко- и постсейсмические эффекты [Киссин, 2009; Копылова, 2010].

Типизация гидрогеосейсмических вариаций, отражающая их изученность до 2000-х гг., представлена в работе [Копылова, 2006а]. В этой работе показано, что различные типы гидрогеосейсмических вариаций представляют отклики подземных вод на воздействие факторов сейсмичности, к которым относятся:

- процессы подготовки землетрясений, которые могут сопровождаться *гидрогеологическими (гидрогеодинамическими и гидрогеохимическими) предвестниками* в изменениях параметров подземных вод вследствие упругой деформации водовмещающих пород, изменения их емкостных и водопроницаемых свойств, развития в них трещинной дилатансии, изменения условий смещения подземных вод различного химического состава [Киссин, 2009];

- изменение статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах местных землетрясений, сопровождающееся *косейсмическими скачками* повышения или понижения уровня (давления) подземных вод;

- динамическая деформация водовмещающих пород и сотрясения стволов скважин при прохождении сейсмических волн от сильных землетрясений, сопровождающиеся разнообразными *ко- и постсейсмическими эффектами*: колебаниями, повышениями и понижениями уровня воды в пьезометрических скважинах, изменениями дебитов и температуры воды в источниках и самоизливающихся скважинах; вариациями химического состава подземных вод.

Ко- и постсейсмические эффекты, вызываемые воздействием на подземные водоносные системы сейсмических волн, излучаемых из очагов землетрясений, регистрируются в изменениях параметров режима скважин и источников на расстояниях до сотен и тысяч км от эпицентра. В литературе имеются их многочисленные описания (см., например, [Wang, Manga, 2010]).

Изменения параметров подземных вод и газов на стадиях подготовки землетрясений (гидрогеологические предвестники) обнаруживаются значительно реже. По данным 1987–1997 гг. о проявлении гидрогеологических предвестников в скважинах Камчатки и мира в работе [Копылова, 2006а] показано, что область их развития значительно меньше по сравнению с размерами областей ко- и постсейсмических эффектов. В указанной работе приводится зависимость характерных размеров областей проявления гидрогеологических предвестников в на-

блюдательных скважинах (d_e – эпицентрально-расстояние, км) от величины магнитуды землетрясений с $M_w \geq 5.0$:

$$M_w \geq 3.37 \cdot \lg d_e - 0.84. \quad (1)$$

Ранее аналогичная зависимость для событий с $M_w \geq 4.0$ приводилась в [Копылова, 1992]:

$$M_w \geq 3.33 \cdot \lg d_e - 0.67. \quad (2)$$

Выражения (1)–(2) дают сопоставимые оценки максимальных размеров областей проявления гидрогеологических предвестников в зависимости от магнитуды землетрясений: для событий с величиной $M_w = 5$ максимальная величина d_e составляет не более 50 км; для $M_w = 6$, $d_e \leq 100$ км, для $M_w = 7$, $d_e \leq 200$ км и для $M_w = 8$, $d_e \leq 400$ км.

Из сопоставления оценок максимальных величин d_e по (1)–(2) с размерами длины очагов землетрясений по простиранию L [Ризниченко, 1976] следует, что для землетрясений с $M_w = 5$ –8 отношение $L/d_e = 2.4$ –6 составляет в среднем 4. Это показывает, что проявление гидрогеологических предвестников в режиме подземных вод является свойством “ближней зоны” очагов будущих землетрясений. При этом их заблаговременность – время от начала возникновения до момента землетрясения, составляет от суток-недель до нескольких месяцев [Копылова, 2006а].

Приведенные данные о пространственно-временных проявлениях гидрогеологических предвестников показывают, что они могут найти практическое применение в системах сейсмического прогнозирования при оценках места и времени сильных землетрясений, сопровождающихся катастрофическими последствиями для населения, инфраструктуры и природной среды сейсмоактивных регионов.

На территории Камчатского сейсмоактивного региона гидрогеосейсмологические исследования проводятся с 1977 г. Определяющий вклад в развитие этого направления внес Камчатский филиал Геофизической службы РАН (с апреля 2016 г. – Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” – КФ ФИЦ ЕГС РАН) при участии Института вулканологии ДВО РАН, ОАО “Камчатгеология”, Института физики Земли РАН и др. организаций.

В статье дается характеристика основных этапов создания наблюдательной сети и организационно-технического развития системы гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке за 40-летний период; приводятся сведения о проявлениях гидрогеологических предвестников в изменениях химического состава и уровней подземных вод в наблюдательных скважинах перед сильными камчатскими

землетрясениями и их практическом использовании в системе сейсмического прогнозирования.

ИСТОРИЯ ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В изучении влияния сейсмичности на режим подземных вод Камчатки выделяются три этапа [Копылова, 2017]:

- ранний, до 1977 г.;
- организация и проведение гидрогеохимических наблюдений на самоизливающихся скважинах и источниках на территории Петропавловского геодинамического полигона, 1977 г. — настоящее время;
- создание системы специализированных наблюдений в скважинах с использованием

автоматических средств регистрации параметров подземных вод (инструментальный этап), 1996 г. — настоящее время.

Ранний этап характеризуется случайными наблюдениями эффектов сильных землетрясений в изменениях режима термальных скважин, источников, гейзеров и парогазовых fumarol. В работе [Манухин, 1979] приводятся сведения об изменениях дебитов и температуры воды Пиначевских источников и скважины ГК-1 в результате 7-ми балльного Петропавловского землетрясения 24 ноября 1971 г., $M_{LH} = 7.3$ (рис. 1). Дебиты источников после этого события увеличились до шести раз, температура воды возросла на 3°C . Стабилизация водной разгрузки источников до фоновых величин продолжалась в течение шести месяцев после землетрясения. Повышенные величины температуры

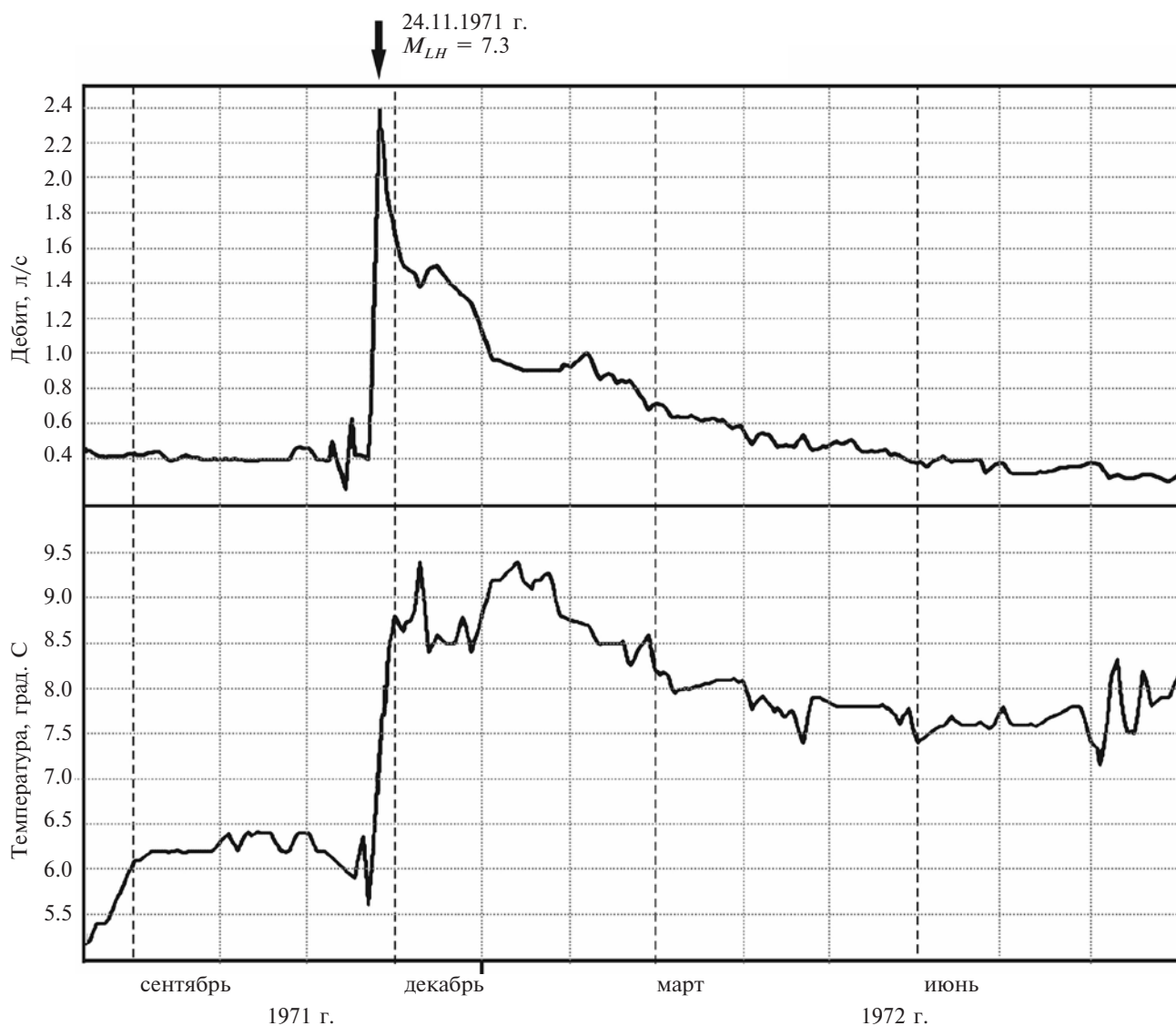


Рис. 1. Изменение дебита и температуры воды Пиначевского источника 1 в результате Петропавловского землетрясения 24.11.1971 г., $M_{LH} = 7.3$ (зона 7 балльных сотрясений) по данным наблюдений ОАО «Камчатгеология» с 01.07.1971 по 01.08.1972 гг. Момент землетрясения показан стрелкой.

и концентраций макрокомпонентов химического состава воды фиксировались до трех–десяти лет. В работе [Копылова, 1992] по данным наблюдений 1971–1988 гг. приводится оценка влияния сейсмичности на водную, тепловую, минеральную разгрузку Пиначевских источников и показано, что в результате сильных местных землетрясений с величинами магнитуд порядка 7 происходит существенное нарушение условий теплопереноса в водоносной системе, питающей источники, в течение месяцев и лет. Вклад сейсмичности, оцененный по превышению амплитудами постсейсмического увеличения разгрузки воды, выноса тепла и минеральных веществ их фоновых величин, оказался достаточно заметным: для водной разгрузки 16% от ее суммарной величины приходилось на постсейсмическое увеличение дебитов источников; для общего количества тепла, вынесенного на поверхность подземными водами, эта величина

составляет 14%; для различных минеральных компонентов – от 8 до 33% (хлор-ион – 33%, натрий и калий – 28%, бор – 8%).

Этап 2. В 1977 г. в Институте вулканологии ДВНЦ АН СССР в лаборатории гидрогеологии и геотермии по инициативе В.М. Сугробова и Ю.М. Хаткевича были организованы регулярные наблюдения на трех источниках и на скважине ГК-1 Пиначевской площади (станция Пиначево, рис. 26). В 1979 г. сотрудники, которые занимались производством режимных наблюдений, были переведены в состав Камчатской опытно-методической сейсмологической партии как отдельное структурное подразделение, сначала группа, впоследствии – лаборатория гидро-сейсмологии (зав. лабораторией Ю.М. Хаткевич, 1979–2009 гг.).

В течение 1983–1992 гг. на территории Петропавловского геодинамического полигона (см. рис. 2а), дополнительно к станции

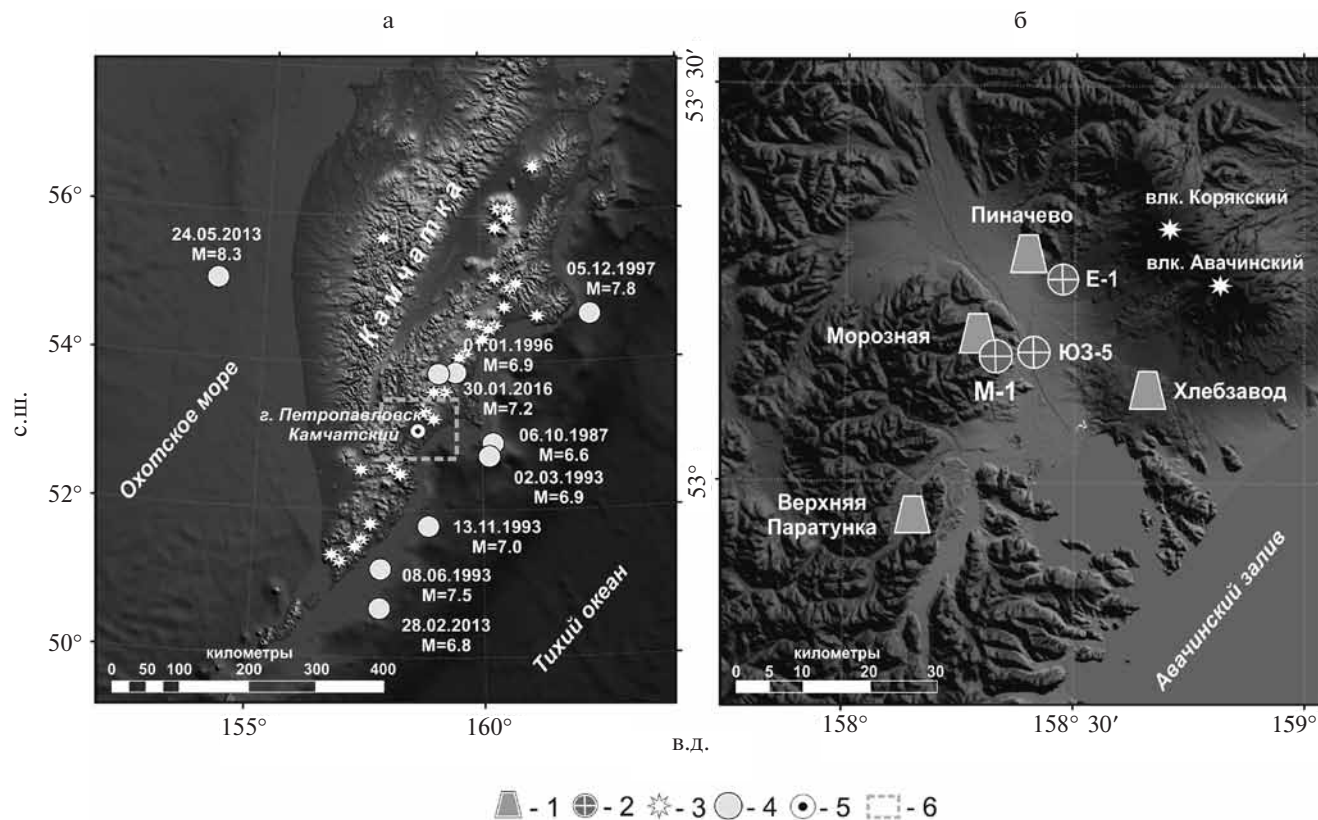


Рис. 2. Схема расположения наблюдательных станций и эпицентров землетрясений.

а – Петропавловский геодинамический полигон (ПГП) и эпицентры сильных землетрясений (указаны даты землетрясений в формате дд.мм.гггг и величины магнитуд), сопровождавшихся гидрогеологическими предвестниками, по данным наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН; б – станции гидрогеохимических и гидрогеодинамических наблюдений на территории ПГП по состоянию на 2017 г.

1 – станции гидрогеохимических наблюдений (Пиначево – скважина ГК-1, глубина $h = 1261$ м и четыре источника; Морозная – скважина Морозная 1, $h = 600$ м; Хлебзавод – скважина Г-1, $h = 2500$ м; Верхняя Паратунка – четыре скважины, $h = 125–1600$ м); 2 – скважины, оборудованные автоматическими системами регистрации физико-химических параметров подземных вод: Е-1 – пьезометрическая скважина, $h = 665$ м; ЮЗ-5 – пьезометрическая скважина, $h = 800$ м; Морозная 1 – самоизливающаяся скважина, $h = 600$ м; 3 – действующие вулканы; 4 – эпицентры землетрясений; 5 – г. Петропавловск-Камчатский; 6 – территория ПГП на рис. 2а.

Пиначево, были организованы наблюдения еще на трех станциях — Морозная (1983 г.), Верхняя Паратунка (1989 г.) и Хлебозавод (1992 г.) (см. рис. 26). С 1992 г. по настоящее время наблюдательная сеть существенно не менялась. Она включает четыре слаботермальных (температура воды 6–11°C) источника на Пиначевской площади, семь самоизливающихся скважин, вскрывающих на глубинах от 120 м до 2,5 км холодные подземные воды в зонах активного и замедленного водообмена и термальные воды азотно-метанового и азотного состава [Копылова и др., 2018].

Методика работ в течение сорока лет не претерпела существенных изменений. Наблюдения на скважинах и источниках проводились один раз в три–шесть дней. При посещении станций производились замеры дебитов объемным способом, замеры температуры воды термометром с ценой деления 0,1°C; отбор проб воды, свобод-

ного и растворенного газа. В отобранных пробах в лабораторных условиях определялся широкий набор компонентов химического состава воды и газа. Подробное описание наблюдательной сети и методики производства работ приводится в работах [Копылова, 2010; Копылова и др., 1994, 2018; Хаткевич, Рябинин, 2004].

В результате таких наблюдений были получены однородные временные ряды различных параметров подземных вод — дебитов и температуры воды, концентраций основных компонентов химического состава воды и газа. В их изменениях были обнаружены постсейсмические эффекты от местных ощутимых землетрясений, проявляющиеся в возрастании дебитов, температуры и минерализации воды, в увеличении или в перераспределении концентраций макрокомпонентов в химическом составе подземной воды и газа в Пиначевских источниках и в скважинах ГК-1 (станция Пиначево),

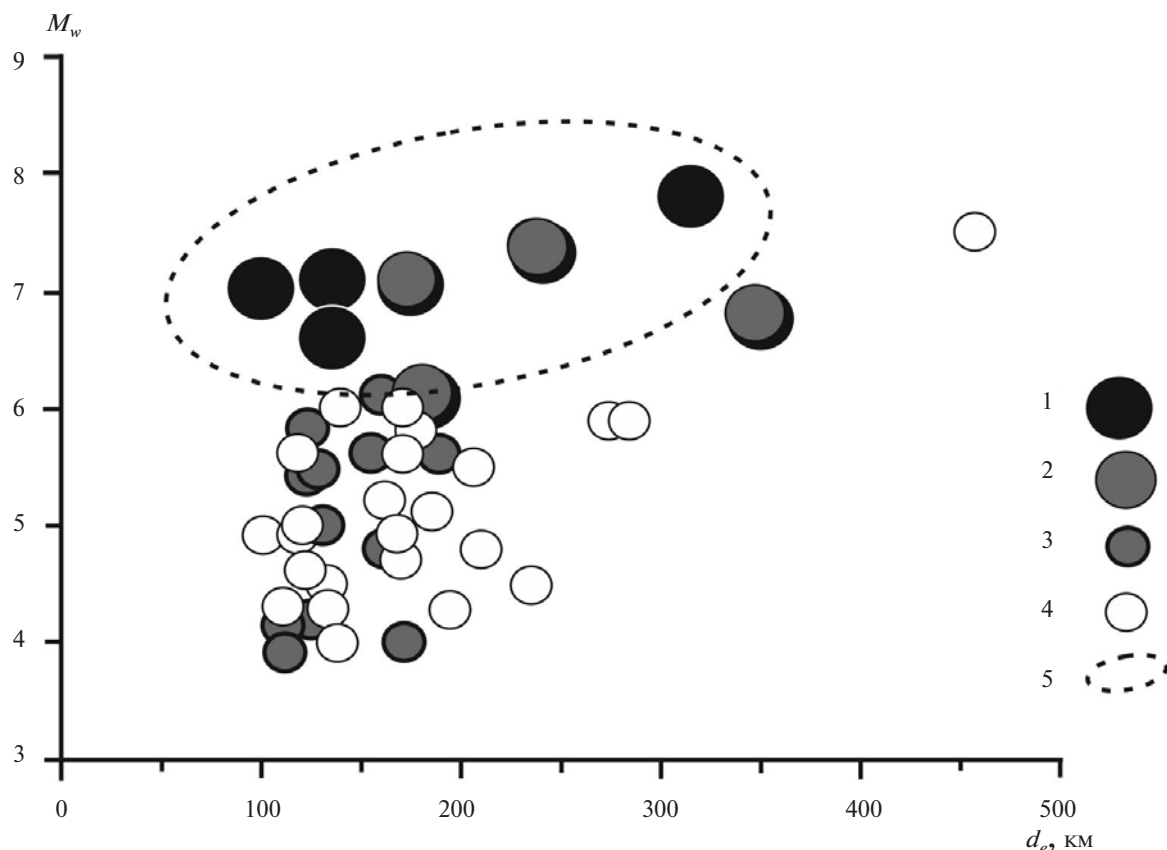


Рис. 3. Проявления различных типов гидрогеосейсмических вариаций в изменениях режима наблюдательных источников и скважин на территории Петропавловского геодинамического полигона в зависимости от параметров землетрясений: магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e , км по данным наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН в 1977–1997 гг.

1 — амплитудные гидрогеохимические предвестники и постсейсмические изменения химического состава воды и газа, повышение дебитов источников и самоизливающихся скважин; 2 — менее выраженные гидрогеохимические предвестники и постсейсмические изменения дебитов и химического состава воды; 3, 4 — постсейсмические вариации: 3 — повышение дебитов и изменение химического состава воды, 4 — повышение дебитов источников; 5 — область параметров M_w и d_e для землетрясений, перед которыми проявлялись гидрогеохимические предвестники.

Морозная 1 (станция Морозная), Г-1 (станция Хлебозавод), ГК-15 и других (станция Верхняя Паратунка).

Перед шестью наиболее сильными сейсмическими событиями 1987–1997 гг.: 06.10.1987 г., $M_w = 6.6$; 02.03.1992 г., $M_w = 6.9$; 08.06.1993 г., $M_w = 7.5$; 13.11.1993 г., $M_w = 7.0$; 01.01.1996 г., $M_w = 6.9$; 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (см. рис. 2а), произошедшими на эпицентральных расстояниях от 90 до 300 км от станций, в скважинах ГК-1, Морозная 1, Г-1, ГК-15 были зарегистрированы изменения показателей химического состава воды и газа, выделенные в гидрогеохимические предвестники. Заблаговременность их проявления перед землетрясениями составляла от одного до девяти месяцев. Наиболее полное описание гидрогеохимических предвестников перед землетрясениями 1987–1997 гг. приводится в работах [Копылова, 2010; Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 1998, 2004].

На рис. 3 в координатах магнитуда – эпицентральное расстояние показаны землетрясения 1977–1997 гг., которые сопровождались различными типами гидрогеосейсмических вариаций в изменениях режима самоизливающихся скважин и источников на территории Петропавловского полигона. Пунктиром выделена область гидрогеохимических предвестников, которые проявлялись в изменениях состава воды и газа в наблюдательных скважинах перед землетрясениями с величинами магнитуд $M_w = 6.6–7.8$ на эпицентральных расстояниях d_e от 90 до 300 км. Интенсивность сотрясений в районе станций при таких событиях составляла $I = 5–6$ баллов по шкале *MSK-64* [Медведев и др., 1965]. Такие события также сопровождались амплитудными постсейсмическими вариациями дебитов, температуры и химического состава воды, в основном, Пиначевских источников. Землетрясения с величинами магнитуд $M_w = 4–6$ на эпицентральных расстояниях $d_e \geq 100–300$ км, вызвавшие сотрясения на территории Петропавловского полигона до $I = 3–4$ баллов, также сопровождались постсейсмическими изменениями дебитов и химического состава воды Пиначевских источников.

На основе закономерных проявлений гидрогеохимических предвестников в изменениях химического состава воды и газа в скважинах ГК-1 и Морозная 1 перед землетрясениями 06.10.1987 г., $M_w = 6.6$ и 02.03.1992 г., $M_w = 6.9$ (см. рис. 2а, 2б) Г.Н. Копыловой, В.М. Сугробовым и Ю.М. Хаткевичем был предложен эмпирический алгоритм среднесрочной оценки времени сильных землетрясений Камчатки, сопровождающихся сотрясениями интенсивностью не менее $I = 5–6$ баллов: *“Наиболее выраженным признаком подготовки сильного*

землетрясения с интенсивностью сотрясений выше 5 баллов в районе г. Петропавловска-Камчатского является совместное проявление относительного уменьшения концентрации хлор-иона в воде скважине ГК-1 за время не менее пяти месяцев с аномальными вариациями других показателей режима наблюдаемых скважин и источников” [Копылова и др., 1994; Хаткевич, 1994]. С использованием этого алгоритма с конца 90-х гг. XX в. осуществляется подготовка еженедельных прогнозных заключений по данным гидрогеохимических наблюдений и их передача в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС). Такие заключения рассматриваются на заседаниях КФ РЭС и учитываются при составлении среднесрочных оценок опасности возникновения сильных землетрясений на Камчатке по комплексу сейсмопрогностических данных [Чебров и др., 2011].

В течение *второго этапа* проводилось изучение процессов формирования гидрогеохимических предвестников и постсейсмических вариаций химического состава подземных вод при воздействии сейсмических волн. В работах [Копылова, Воропаев, 2006; Копылова, Болдина, 2012] представлены физико-химические модели гидрогеосейсмических вариаций химического состава воды Пиначевских источников, скважин Морозная 1 и ГК-1. В качестве ведущего механизма образования гидрогеохимических предвестников и постсейсмических эффектов в составе поступающих на поверхность подземных вод рассматривалось изменение условий смешивания в зонах повышенной водопроницаемости и в стволах скважин контрастных по составу вод, присутствующих в водоносных системах наблюдательных скважин и источников [Wang et al., 2004].

В течение *второго этапа* разрабатывались методы обработки полученного массива гидрогеохимических данных наблюдений с использованием различных модификаций одномерного и многомерного статистического анализа временных рядов для формализованного выделения сигналов подготовки землетрясений авторов А.А. Любушина, Г.Н. Копыловой, Г.В. Рябинина, Ф. Белла, П.Ф. Бьяджи, С. Кингсли и др. Результаты применения статистических методов в части диагностики эффектов сейсмичности хорошо согласовывались с описанными ранее в работах [Копылова и др., 1994; Хаткевич, 1994 и др.] данными наблюдений гидрогеохимических предвестников и постсейсмических эффектов в изменениях состава подземных вод на стадиях подготовки и реализации сильных землетрясений Камчатки (см. например, [Копылова,

Таранова, 2013; Bella et al., 1998; Biagi et al., 2000, 2000a, 2000b, 2001; Kingsley et al., 2001]).

Важнейшими результатами **второго этапа** гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке в области сейсмического прогноза являются:

- обнаружение гидрогеохимических предвестников в изменениях макрокомпонентного состава подземных вод и газов с заблаговременностью от 1 до 9-ти месяцев до возникновения сильных местных землетрясений ($M_w = 6.6–7.8$, $d_e = 90–300$ км, $M_w/lgd_e \geq 3.1$, интенсивность сотрясений не менее $I = 4–6$ баллов, см. рис. 3);

- практическая реализация в системе сейсмического прогнозирования в Камчатском крае выявленных пространственно-временных закономерностей проявления гидрогеохимических предвестников для среднесрочной (с заблаговременностью от недель до месяцев) оценки времени сильных землетрясений в Камчатской сейсмоактивной зоне на расстояниях до первых сотен км от наблюдательных станций.

Этап 3 – инструментальный. В течение инструментального этапа (1996 г. – настоящее время) по инициативе и под руководством доктора геол.-мин. наук Г.Н. Копыловой сотрудниками лаборатории геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН три скважины Е-1 (1996 г.), ЮЗ-5 (1997 г.) и Морозная 1 (2013 г.) (см. рис. 2б) были оборудованы системами цифровой регистрации параметров подземных вод – уровня, температуры, электропроводности воды и метеорологических параметров – температуры воздуха и атмосферного давления. Измерения всех параметров осуществлялись с периодичностью 10–5 минут.

В течение 1996–2013 гг. трижды проводилась модернизация оборудования на скважинах. В 1996–2000 гг. использовались датчики давления ДУ и ДА разработки ОКБ ИФЗ РАН [Багмет и др., 1989]. В 2001–2010 гг. регистрация гидрогеологических и метеорологических параметров проводилась аппаратурой серии Кедр А2 (производитель оборудования – ООО Полином, г. Хабаровск) с накоплением данных на твердотельную память. Съём и обработка данных осуществлялись один раз в две недели. С 2010 г. использовалась аппаратура серии Кедр ДМ с передачей данных по каналам сотовой связи [Копылова и др., 2016; Kopylova et al., 2017]. Аналогичные комплекты оборудования также были установлены ОАО “Камчатгеология” еще на пяти скважинах на территории Камчатского края для проведения гидрогеодинамического мониторинга по методике ВСЕГИНГЕО [Копылова, Смолина, 2009; Копылова и др., 2007].

В течение **третьего этапа** были созданы методика обработки данных уровнемерных

наблюдений для выделения гидрогеосейсмических вариаций уровня воды (2004–2010 гг., Г.Н. Копылова, С.В. Болдина); программные средства Информационной системы POLYGON (2003 г., Г.Н. Копылова, Е.Р. Латыпов, Е.А. Пантюхин), с помощью которой осуществляется пополнение базы данных в составе Информационно-обрабатывающего центра КФ ФИЦ ЕГС РАН, оперативная обработка и анализ уровнемерных данных в режиме близком к реальному времени.

В пьезометрических скважинах Е-1 и ЮЗ-5 и в скважинах ОАО “Камчатгеология” регистрация вариаций уровня воды проводилась с использованием высокочувствительных ультразвуковых датчиков с разрешением ± 0.1 см, разработанных к. т. н. Г.А. Калиновым, Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск. С помощью таких датчиков были получены уникальные данные во время сильных камчатских и сильнейших мировых землетрясений 1997–2017 гг. [Болдина, Копылова, 2017; Копылова, 2006, 2010; Копылова, Болдина, 2012; Копылова и др., 2012, 2016 и др.].

Ниже приводится описание гидрогеосейсмических вариаций в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, зарегистрированных при наиболее сильных землетрясениях 1997–2017 гг., произошедших на Камчатке.

Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (КЗ) (см. рис. 2а). Наблюдательные скважины располагались на эпицентральной расстоянии $d_e = 300$ км (см. рис. 2а) в зоне сотрясений с интенсивностью $I = 5–6$ баллов [Левина и др., 2003]. По распределению афтершоков первых суток очаг КЗ протяженностью 220 км располагался к юго-западу от инструментального эпицентра, и расстояние от центра очаговой области КЗ до скважин составляло около 200 км.

В связи с КЗ впервые было зарегистрировано последовательное проявление гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, соответствующих основным факторам сейсмического воздействия на водовмещающие породы – процессам подготовки землетрясения, статического перераспределения напряженного состояния среды при образовании разрыва в очаге и динамического воздействия сейсмических волн (рис. 4) [Копылова, 2006, 2010; Копылова, Болдина, 2012 и др.].

В течение трех недель перед КЗ наблюдалось понижение уровня воды в обеих скважинах, выделенное в гидрогеодинамический предвестник этого события [Копылова, 2006] (см. рис. 4а, 4б). Амплитуда понижения уровня в скважине ЮЗ-5 составила $\Delta h = -11$ см, в скважине Е-1 $\Delta h = -1$ см. Гидрогеодинамический предвестник проявлялся синхронно с горизонтальными перемещениями

GPS-станций камчатской сети KAMNET на расстояниях до первых сотен км от очага. Такие перемещения в работе [Gordeev et al., 2001] были выделены в деформационный предвестник этого события. В работе [Копылова, Болдина, 2012] с использованием данных уровнемерных, деформометрических и сейсмологических наблюдений показано, что формирование гидрогеодинамического предвестника было вызвано объемным расширением водовмещающих пород в районах

скважин с амплитудой $D_t = 7 \cdot 10^{-8}$ вследствие развития асейсмических движений в области будущего очага КЗ.

В скважине ЮЗ-5, после образования разрыва в очаге КЗ, в течение примерно 12 мин фиксировался скачок понижения уровня с амплитудой 12 см ($\Delta h = -12$ см) (см. рис. 4в), показывающий реакцию давления подземных вод на развитие объемной косейсмической деформации водовмещающих пород [Копылова,

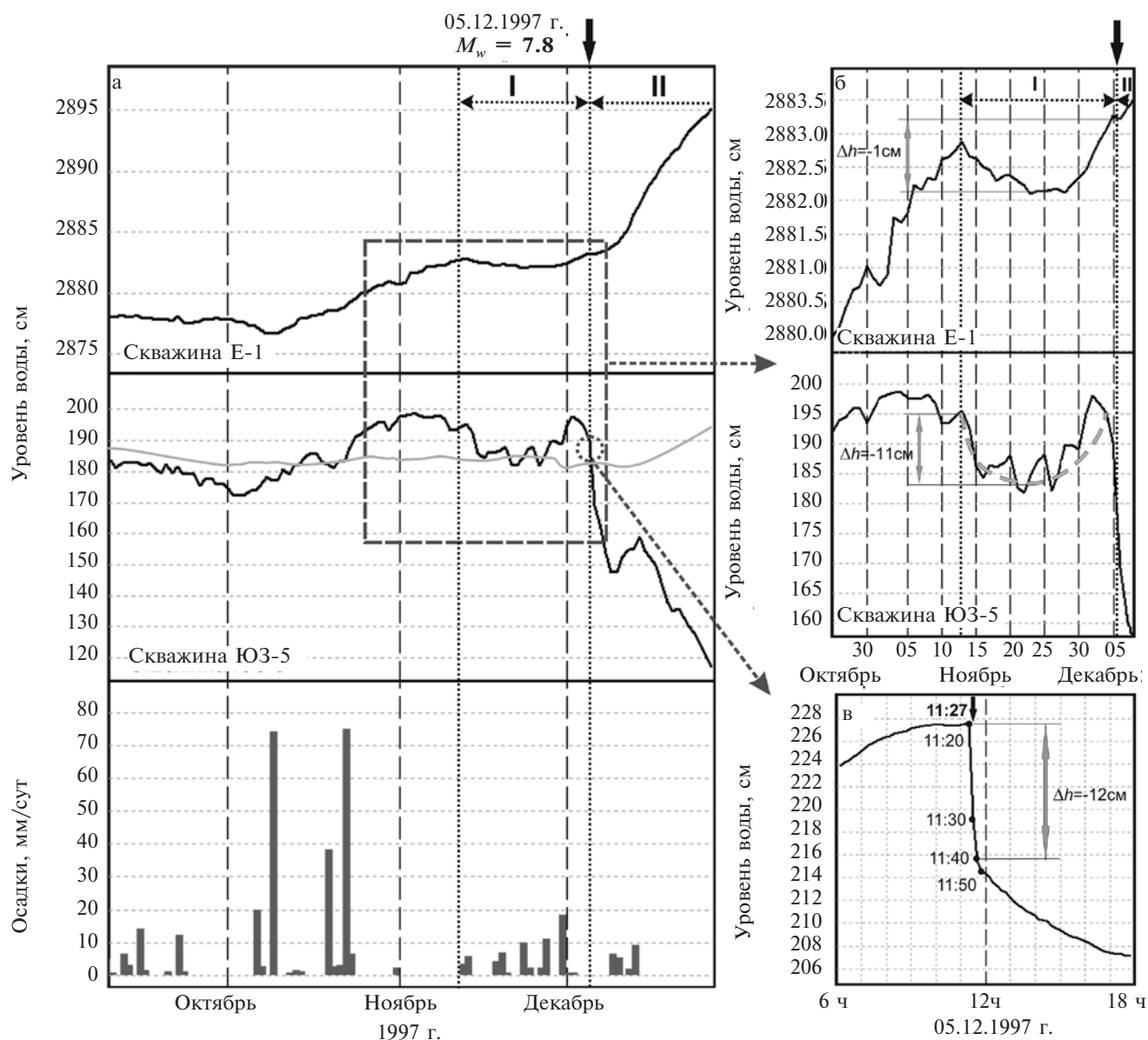


Рис. 4. Изменения уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 в период Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$. а — изменения уровня воды в скважинах с 9 сентября по 31 декабря 1997 г. в сопоставлении с суточными осадками по данным метеостанции Пионерская: цифрами I и II и двухсторонними горизонтальными стрелками выделены интервалы времени: I — проявления гидрогеодинамического предвестника КЗ (см. врезку рис. 2б; двухсторонними вертикальными стрелками и цифрами показаны величины амплитуд понижения уровня воды); II — проявления косейсмического скачка понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 (см. врезку рис. 2в: 11:27 — время вступления сейсмических волн по данным сейсмостанции РЕТ) и постсейсмических вариаций уровня воды.

2006]. Величина деформации расширения водовмещающих пород по уровнемерным данным составляла $D_t = 8 \cdot 10^{-8}$ и хорошо согласовалась с оценкой косейсмической деформации в районе скважины по модели протяженного дислокационного источника с параметрами очага СМТ. Описание методики получения точечных оценок косейсмической объемной деформации водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений в скважине ЮЗ-5 приводится в работе [Копылова и др., 2010].

Динамическое воздействие сейсмических волн на состояние водовмещающих пород и сотрясение стволов скважин сопровождалось амплитудными изменениями уровней воды в обеих скважинах в течение длительного времени (см. рис. 4а). В скважине ЮЗ-5 продолжительность возмущенного состояния системы “скважина – водовмещающая порода” в результате КЗ составляла примерно 2.5 года, и проявлялась в понижении уровня воды на 1 м в течение трех месяцев и последующем его восстановлении в течение двух лет. В скважине Е-1 после КЗ уровень воды повышался в течение трех месяцев с амплитудой 30 см [Копылова, 2006].

Сильные землетрясения 2013 г. В 2013 г. в южной части Камчатской сейсмофокальной зоны произошла серия сильных землетрясений [Сильные ..., 2014]. Максимальные магнитуды сейсмических событий достигали $M_w = 6.8$ (28.02.2013 г.) и $M_w = 8.3$ (мантийное Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г.) (см. рис. 2а). Эти землетрясения, а также другие сейсмические события 2013 г. с величинами магнитуд $M_w \geq 6.0$, сопровождались косейсмическими скачками повышения и понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудами Δh от 0.2 до 7 см [Копылова и др., 2016; Kopylova et al., 2017] (рис. 5б, 5в), которые соответствовали оценкам амплитуд и характеру косейсмической объемной деформации в районе скважины по модели протяженного дислокационного источника [Okada, 1985] с параметрами очагов из международного каталога тензоров сейсмического момента землетрясений Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>) [Болдина, Копылова, 2016]. По амплитудам косейсмических скачков уровня воды количественно оценивались величины объемной косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 при образовании разрывов в очагах землетрясений (D_t от $\text{ед.} \cdot 10^{-9}$ до $\approx 1 \cdot 10^{-7}$). Характер деформации определялся по направлению скачков уровня воды: повышение указывало на развитие объемной деформации сжатия водовмещающих пород, понижение уровня – на развитие деформации объемного расширения.

Соответствие оценок объемной косейсмической деформации по данным наблюдений в скважине ЮЗ-5, с учетом амплитуд и характера косейсмических скачков уровня воды, с теоретическими оценками по модели [Okada, 1985] подтверждало хорошие деформометрические свойства этой скважины в диапазоне величин $D_t = \text{ед.} \cdot 10^{-9} - \text{ед.} \cdot 10^{-7}$. Вместе с тем, гидрогеодинамические предвестники в изменениях уровня воды в этой скважине перед землетрясениями 28 февраля, 24 мая и перед другими сильными землетрясениями 2013 г. не были диагностированы.

Постсейсмические вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5 зарегистрированы в связи с событиями 28 февраля (понижение уровня в течение 1.5 месяцев с амплитудой $\Delta h = -35$ см) и 24 мая (повышение уровня воды в течение месяца с амплитудой $\Delta h = 24$ см) (см. рис. 5а). После землетрясения 28 февраля также произошло понижение температуры воды с амплитудой 0.6°C и повышение электропроводности на 4 мСм/м. Такие изменения физико-химических параметров подземных вод также относятся к постсейсмическим вариациям в режиме этой скважины. 7 января 2013 г., примерно за 8 недель до землетрясения 28 февраля, было зарегистрировано повышение электропроводности воды с амплитудой 6 мСм/м (см. рис. 5а). Возможное значение этого эффекта для прогноза землетрясений можно будет оценить по результатам дальнейших наблюдений.

В изменениях уровня воды в скважине Е-1 по данным 30-летних наблюдений (с 1987 г. по настоящее время) обнаружены два типа гидрогеодинамических предвестников:

- предвестник ГП_I со временем упреждения от суток до десятков суток [Копылова, 2001, 2013; Копылова, Болдина, 2012а];
- предвестник ГП_II с временем упреждения до нескольких лет [Копылова, 2001; Фирстов и др., 2016].

Гидрогеодинамический предвестник ГП_I проявляется в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью в течение суток–месяца перед землетрясениями с $M_w \geq 5.0$ на эпицентральных расстояниях $d_e \leq 350$ км. В работах [Копылова, 2001, 2013] приводится параметрическое описание ГП_I. Регулярная повторяемость ГП_I перед землетрясениями с $M_w \geq 5.0$ (более 70% случаев), а также улучшение статистической связи его проявлений с последующими землетрясениями с ростом величин их магнитуды позволяют использовать ГП_I для среднесрочной оценки времени возникновения местных землетрясений с величинами магнитуд $M_w \geq 5.5 \pm 0.5$ с заблаговременностью сутки–недели [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2012а; Копылова, Сизова,

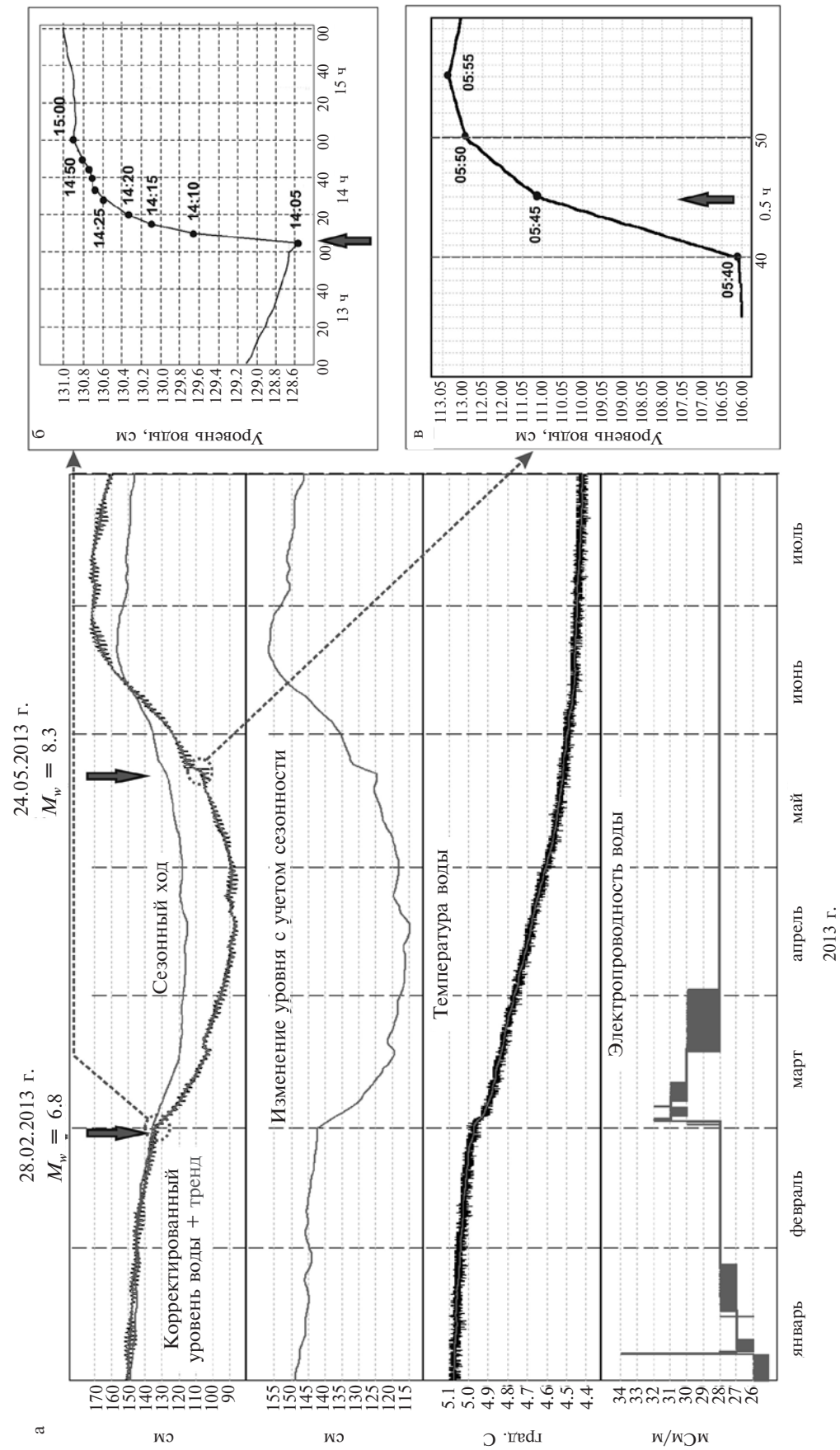


Рис. 5. Изменения физико-химических параметров подземных вод в скважине ЮЗ-5 в январе-июле 2013 г. а – изменения уровня, температуры и электропроводности воды, включающие ко- и постсейсмические вариации вследствие землетрясений 28 февраля и 24 мая 2013 г. (показаны стрелками). На врезках показаны косейсмические повышения уровня воды после вступления сейсмических волн от землетрясения 28.02.2013 г. (б) и Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. (в) по данным 5-минутных наблюдений.

2012; Копылова и др., 2012]. С начала 2000-х гг. ГП_I используется для составления и передачи в экспертные советы по прогнозу землетрясений заключений о возможности сильных землетрясений в Камчатском регионе с упреждением до одного месяца [Сильные ..., 2014; Чебров и др., 2011, 2016; Фирстов и др., 2016].

На рис. 6 показаны изменения уровня в скважине Е-1 в период землетрясения 28.02.2013 г. в сопоставлении с моментами начала проявления ГП_I (стрелка 1 на нижнем графике), землетрясения (3) и датой подачи прогнозного

заключения в КФ РЭС (2). В прогнозном заключении от 1 февраля 2013 г. указывалось, что *“в течение времени 1–2 месяца повышена вероятность возникновения землетрясения с $M_w \geq 5.0$ на расстоянии до 350 км от скважины”*. Кроме этого, в заключении приводились оценки надежности сделанного сейсмического прогноза для землетрясений с различными величинами магнитуды, основывающиеся на результатах ретроспективного анализа проявлений ГП_I за многолетний период [Копылова, Сизова, 2012]: *“вероятность*

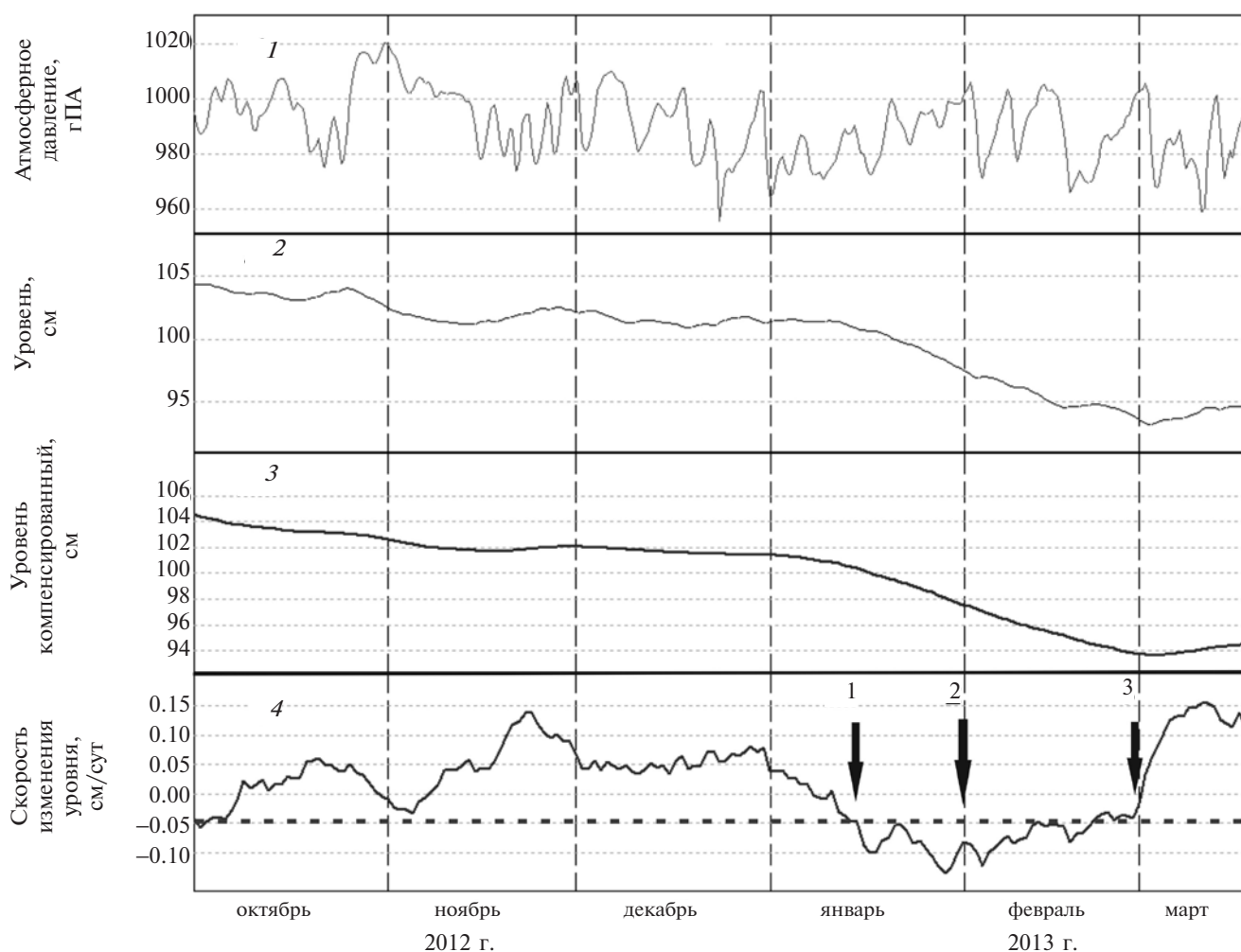


Рис. 6. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1 октября 2012 по 18 марта 2013 гг., включающие проявление гидрогеодинамического предвестника ГП_I и постсейсмическое повышение в связи с землетрясением 28 февраля 2013 г., $M_w = 6.9$.

1, 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 4 стрелками показаны: 1 — 16 января 2013 г., начало проявления гидрогеодинамического предвестника ГП_I; 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.

события с $M_w \geq 5.0$ $p = 0.45$, вероятность события с $M_w \geq 5.9$ $p = 0.73$ ". Землетрясение 28 февраля 2013 г. соответствовало прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, по времени и по местоположению, и этот прогноз признан КФ РЭС оправдавшимся [Сильные ..., 2014, с. 152]. Изменения 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 (см. рис. 6, графики 3 и 4), является типичным в случаях проявления сильных ($M_w \geq 6.6$) местных землетрясений на расстояниях до 300 км [Копылова, 2001].

Второй тип прогностического сигнала в изменениях уровня воды в скважине Е-1 (ГП_II) был впервые выделен в 2001 г. [Копылова, 2001] и подтвержден в 2016 г. [Фирстов и др., 2016]. ГП_II проявляется в длительных (до 6-ти лет) понижениях уровня воды с повышенной скоростью, предшествующих и сопровождающих возникновение групп сильных землетрясений на Камчатке. Такие понижения уровня воды наблюдались в 1991–1997 гг. (шесть землетрясений 1992–1997 гг. с магнитудами $M = 6.9$ – 7.8 на эпицентральных расстояниях до 300 км) и в 2012–2017 гг. (серия сильных землетрясений 2013–2016 гг. с максимальными магнитудами $M_w = 6.8$ – 8.3). Мы полагаем, что такие длительные понижения уровня воды в скважине Е-1 отражают геодинамические ситуации, сопряженные с подготовкой и возникновением землетрясений с M порядка 7 и более на прилегающем к территории ППП участке Камчатской сейсмофокальной зоны, и вызываются увеличением емкости водовмещающих пород при развитии в них трещинной дилатансии и фазовых изменений в системе “вода–газ”.

В период *Жупановского землетрясения 30.01.2016 г.*, $M_w = 7.2$, $I = 5$ баллов, $d_e = 90$ км, гипоцентрального расстояния 200 км (ЖЗ), (см. рис. 2а) в изменениях уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 были зарегистрированы ко- и постсейсмические вариации, а также гидрогеодинамические предвестники на стадии подготовки этого сейсмического события (рис. 7в, рис. 8).

В скважине ЮЗ-5 в течение 3.5 мес. перед ЖЗ наблюдалось аномальное повышение уровня воды с амплитудой не менее 20 см, существенно нарушающее годовой сезонный ход. Такое повышение уровня воды было выделено в гидрогеодинамический предвестник ЖЗ (см. рис. 7в) [Болдина, Копылова, 2017].

После вступления сейсмических волн от ЖЗ уровень воды повышался в течение 45 минут с амплитудой $\Delta h = 9.4$ см (см. рис. 7б) вслед-

ствие наложения косейсмического возрастания давления подземной воды и соответствующего скачка повышения уровня воды в скважине и импульсного увеличения давления вблизи ствола скважины при сейсмических сотрясениях. Оцененная величина амплитуды косейсмического повышения уровня ($\Delta h = 7.3$ см) и соответствующей величины деформации сжатия водовмещающих пород $D_1 = -4.5 \cdot 10^{-8}$ по усредненным данным согласовалась с оценкой объемной косейсмической деформации в районе скважины по модели дислокационного источника в однородном упругом изотропном пространстве с параметрами механизма очага ЖЗ ($D_2 = -4.6 \cdot 10^{-8}$).

После ЖЗ уровень понижался в течение трех месяцев с амплитудой $\Delta h = \sim 40$ см (см. рис. 7в) вследствие падения напора в водоносном горизонте за счет улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях.

В скважине Е-1 последовательно проявились гидрогеодинамический предвестник ГП_I в течение 21 сут перед ЖЗ и повышение уровня с амплитудой 3.7 см в течение месяца после землетрясения (см. рис. 8). Амплитуда понижения уровня за это время составила $\Delta h = -2.2$ см при среднесуточной скорости -0.06 – -0.12 см/сут (см. рис. 8а, 8бб).

С использованием ГП_I, выявленного в реальном времени, был составлен и передан в КФ РЭС 21 января 2016 г. прогноз о повышенной вероятности сильного землетрясения на расстоянии до 350 км от скважины Е-1 в течение месяца. ЖЗ соответствовало этому прогнозу по величине магнитуды, по времени и по местоположению [Чебров и др., 2016].

В течение *третьего этапа* также были выполнены научно-исследовательские работы: по созданию моделей формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважинах – гидрогеодинамических предвестников, ко- и постсейсмических вариаций (на примере скважины ЮЗ-5); по оценке информативности наблюдательных скважин для обнаружения гидрогеодинамических предвестников землетрясений и количественных оценок деформации водовмещающих пород (Г.Н. Копылова, С.В. Болдина).

Результаты выполнения комплекса технических и научно-исследовательских мероприятий на третьем этапе гидрогеосейсмологических исследований составляют научно-методическую основу нового метода мониторинга современных геодинамических процессов и прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском сейсмоактивном регионе с использованием гидрогеологических данных.

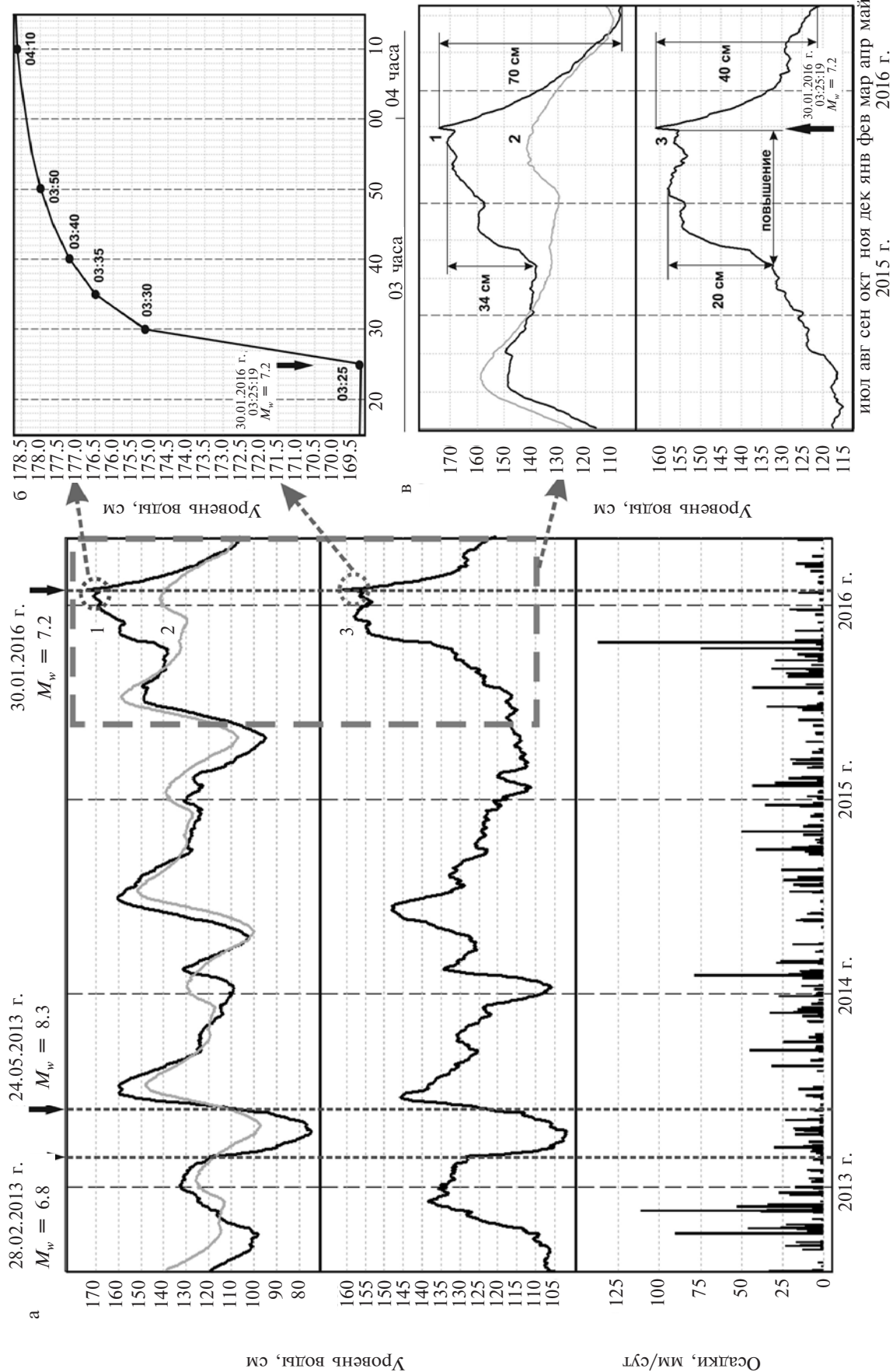


Рис. 7. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5 в период Жупановского землетрясения 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$ (см. рис. 2). а — изменения уровня воды в июле 2012 — мае 2016 гг. в сопоставлении с осадками и наиболее сильными землетрясениями (показаны стрелками и см. рис. 2); 1 — среднечасовые данные наблюдений с компенсированными баровариациями; 2 — сезонные вариации уровня воды совместно с линейным трендом; 3 — остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда: жирным пунктиром обозначен фрагмент графиков в период воздействия подготовки и реализации Жупановского землетрясения, (см. рис. 7в); б — косейсмическое повышение уровня воды после вступления сейсмических волн (03:25); в — гидрогеодинамический предвестник и постсейсмические изменения уровня воды.

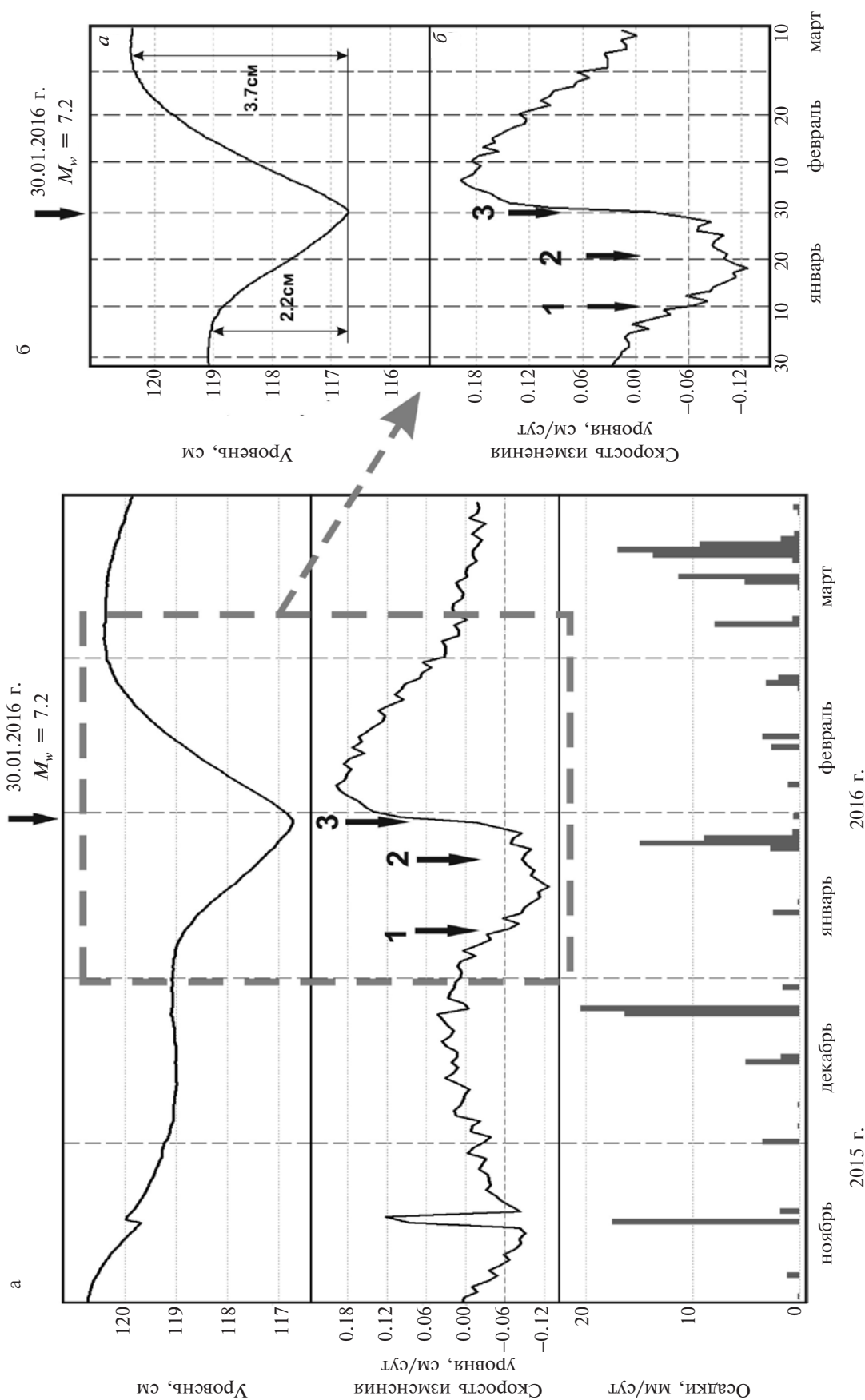


Рис. 8. Изменения уровня воды в скважине Е-1 в период Жупановского землетрясения 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$.

а – изменение уровня воды и его среднесуточной скорости с ноября 2015 по март 2016 гг. в сопоставлении с осадками. На графике среднесуточной скорости изменения уровня воды цифрами показаны: 1–10 января – начало проявления гидрогеодинамического предвестника ГП-1, 2–21 января – дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС о возможности сильного землетрясения, 3–30 января – Жупановское землетрясение; пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды – 0.06 см/сут; жирной пунктирной линией выделен фрагмент изменений уровня воды в период Жупановского землетрясения, представленный на рис. 8б; а – изменения уровня воды с 30 декабря 2015 по 10 марта 2016 гг., включающие гидрогеодинамический предвестник и постсейсмическое повышение; б – изменение среднесуточной скорости вариаций уровня воды в сопоставлении с ее пороговой величиной – 0.06 см/сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее ценными результатами многолетних непрерывных наблюдений на сети наблюдательных скважин Петропавловского геодинамического полигона являются достоверные данные о гидрогеологических предвестниках в изменениях физико-химических параметров подземных вод перед сильными ($M = 6.6–7.8$) землетрясениями Камчатки. Совокупность таких данных составляет научное обоснование использования гидрогеологического метода в решении задач геофизического мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском сейсмоактивном регионе.

С использованием выявленной связи между проявлениями гидрогеохимических и гидрогеодинамических предвестников и параметрами землетрясений предложены методы среднесрочной оценки времени сильных землетрясений Камчатки с M порядка 7 и более по текущим данным наблюдений, которые реализуются в практике работы действующих в Камчатском крае советов по прогнозу землетрясений.

По данным наблюдений на скважине Е-1 были осуществлены заблаговременные прогнозы ряда сильных землетрясений 2004–2016 гг. включая землетрясение 28.02.2013 г. и Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с временем упреждения от первых суток до одного месяца.

По данным наблюдений на скважине ЮЗ-5 осуществлялись оценки объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в диапазоне величин $\text{ед.} \cdot 10^{-9}–1 \cdot 10^{-7}$.

Кроме этого, получены важные научно-технические результаты, обеспечивающие задел для дальнейшего развития гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке. К таким результатам относятся:

- создание в КФ ФИЦ ЕГС РАН системы специализированных гидрогеологических наблюдений на скважинах, функционирующей в режиме близком к реальному времени и ориентированной на оперативное выделение гидрогеосейсмических вариаций в изменениях физико-химических параметров подземных вод, включая гидрогеологические (гидрогеохимические и гидрогеодинамические) предвестники сильных местных землетрясений;

- создание информационных ресурсов гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке в составе пополняемой базы данных режимных наблюдений на сети скважин и источников Петропавловского полигона за период наблюдений с 1971 г. по настоящее время; данных по наблюдательным скважинам и текстов публикаций, содержащих систематическое описание гидрогеологических эффектов при произошед-

ших землетрясениях (см. <http://www.emsd.ru/lgi/result>).

База данных специализированных гидрогеологических наблюдений на Камчатке за 40-летний период и материалы по вариациям физико-химических параметров подземных вод при произошедших землетрясениях, в том числе по гидрогеологическим предвестникам, являются уникальными. Они могут использоваться при постановке новых научных и прикладных задач по углубленному изучению влияния сейсмичности на подземные воды и созданию новых методов сейсмического прогноза с использованием гидрогеологических данных.

Перспективы развития гидрогеосейсмологических исследований на Камчатке связаны с дальнейшим накоплением достоверных данных о разнообразных откликах подземных вод на сейсмические воздействия, в первую очередь, о гидрогеологических предвестниках, закономерностях их проявления и связи с параметрами сильных землетрясений.

Важными направлениями работ также является:

- исследование процессов формирования гидрогеологических предвестников землетрясений и других эффектов сейсмичности в различных природных и природно-технических системах, таких как “скважина – водовмещающая порода”, система взаимодействия “вода – порода – газ” и др. с использованием моделирования;

- дальнейшее техническое развитие системы специализированных гидрогеологических наблюдений на Камчатке.

Следует также отметить, что данные, полученные за 40-летний период наблюдений на скважинах и источниках Камчатки, широко востребованы. С их использованием опубликованы десятки работ в ведущих рецензируемых журналах в России и за рубежом, защищены четыре кандидатских диссертации (Г.Н. Копылова, Г.В. Рябинин, Е.А. Запорева, С.В. Болдина), две докторских диссертации (А.А. Любушин, 1996 г.; Г.Н. Копылова, 2010 г.); подготовлены дипломные работы выпускниками Камчатского государственного университета им. Витуса Беринга, Камчатского государственного технического университета, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Томского политехнического университета и др.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках плановых тем НИР КФ ФИЦ ЕГС РАН рег. №№ АААА-А16-116070550057-7, АААА-А16-116070550059-1 при финансовой

поддержке РФФИ, грант 18-05-00337 “Типизация и модели гидрогеосейсмических эффектов землетрясений по данным уровневых наблюдений в скважинах (на примере Камчатского региона)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине “Обнинск” // Физика Земли. 1989. № 11. С. 84–95.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н. Косейсмические эффекты сильных камчатских землетрясений 2013 г. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 2. Вып. № 30. С. 66–76.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w = 7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880. DOI: 10.5800/GT-2017-8-4-0321.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.
- Киссин И.Г., Пиннекер Е.В., Ясько В.Г. Подземная гидросфера и сейсмические процессы // Основы гидрогеологии. Т. 4. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 57–78.
- Копылова Г.Н. Анализ влияния сейсмичности на режим Пиначевских термопроявлений на Камчатке (по результатам наблюдений в 1979–1988 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 3–18.
- 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.
- Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
- Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006а. № 1. Вып. № 7. С. 50–66.
- Копылова (Гриц) Г.Н. Эффекты сейсмичности в режиме подземных вод (на примере Камчатского региона) // д/я. ... доктора геол.-мин. наук по специальности 25.00.07 – Гидрогеология. г. Петропавловск-Камчатский, 2010. 219 с.
- Копылова Г.Н. О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382–386.
- Копылова Г.Н. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 16–19.
- 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.
- 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. 2012а. Т. 13. № 1. С. 39–49.
- 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. 2012б. № 5. С. 41–54. DOI: 10.1134/S074204631205003X.
- Копылова Г.Н., Воронаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.
- 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. Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116–125.
- 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.
- Копылова Г.Н., Таранова Л.Н. Сигналы синхронизации в изменениях химического состава подземных вод Камчатки в связи с сильными ($M_w \geq 6.6$) землетрясениями // Физика Земли. 2013. № 4. С. 135–144. DOI: 10.7868/S0002333713040066.
- 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., 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., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. С. 43–56. DOI: 10.21455/si2016.4-4.
- Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51–61. DOI: 10.1134/S1069351310010040.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смолина Н.Н. и др. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки (по данным на-

блюдений 1987–2011 гг.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 236–269.

Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62.

Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251–271.

Манухин Ю.Ф. Влияние землетрясений на динамику термальных вод Камчатки // Тезисы докладов IX совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, Петропавловск-Камчатский, 1979. С. 135.

Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.

Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. “Новая книга”, 2014. 252 с.

Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильно-го тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. № 2. 1967. Т. 176. С. 319–321.

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.

Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГАРФ, 1998. С. 134–147.

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.

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.

Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_S = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.

Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 106–114.

Bella F., Biagi P.F., Caputo E. et al. Hydrogeochemical anomalies in Kamchatka (Russia) // Phys. Chem. Earth. 1998. V. 23. № 9–10 P. 921–925.

Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P. et al. Possible precursors in groundwater ions and gases content in Kamchatka (Russia) // Phys. Chem. Earth. (A). 2000. № 3. V. 25. P. 295–305.

Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P. et al. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia) // Pageopch. 2000a. V. 157. P. 1359–1377.

Biagi P.F., Ermini A., Cozzio E. et al. Hydrogeochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997 // Natural Hazard. 2000b. V. 21. P. 263–276.

Biagi P.F., Piccolo R., Ermini A. et al. Hydrogeochemical precursors of strong earthquakes in Kamchatka: further analysis // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. V. 1. № 1–2. P. 9–14.

Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189–198.

Kingsley S.P., Biagi P.F., Piccolo R. et al. Hydrogeochemical precursors of strong earthquakes: a realistic possibility in Kamchatka // Phys. Chem. Earth (C). 2001. V. 26. № 10–12. P. 769–774.

Kopylova G.N., Boldina S.V., Smirnov A.A., Chubarova E.G. Experience in Registration of Variations Caused by Strong Earthquakes in the Level and Physicochemical Parameters of Ground Waters in the Piezometric Wells: the Case of Kamchatka // Seismic Instruments. 2017. V. 53. № 4. P. 286–295. DOI: 10.3103/S0747923917040065.

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.

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.

Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water / Lecture Notes in Earth Sciences. V. 114. Berlin: Springer, 2010. 249 p. DOI 10.1007/978-3-642-00810-8.

HYDROGEOSEISMOLOGICAL RESEARCH IN KAMCHATKA: 1977–2017**G. N. Kopylova*, S. V. Boldina***Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia***e-mail: gala@emsd.ru*

Received February 7, 2018

This paper is concerned with the main stages in the setting-up and technical development of a system specializing in physical and chemical parameters of groundwater at a network of wells and springs in the Petropavlovsk Geodynamic Test Area, Kamchatka. The focus is on a description of hydrogeochemical and hydrogeodynamic precursors to Kamchatka earthquakes ($M_w = 6.6\text{--}7.8$) that occur a few weeks to a few months before a seismic event, manifesting themselves in anomalous changes in chemical composition and groundwater level. The precursors are discussed in application to their use at specialized councils on earthquake prediction. It is shown that the system of automated observation of groundwater parameters at wells as developed at the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS) is capable of identifying hydrogeodynamic precursors of water-level in near real time and of providing, in some particular cases, quantitative estimates of pre-seismic and coseismic deformation of water-saturated rocks. This can be useful in geophysical monitoring and intermediate-term prediction of strong earthquakes for the Kamchatka region.

Key words: Kamchatka, earthquake, well, water level, underground water chemical composition, precursor, earthquake prediction.