



STUDY OF SEISMIC EFFECTS ON CHANGES IN GROUNDWATER PRESSURE: EQUIPMENT AND SOME WELL OBSERVATION RESULTS FOR THE KAMCHATKA PENINSULA

S.V. Boldina , G.N. Kopylova ✉, V.A. Kobzev

Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

ABSTRACT. The relevance of the work is determined by the necessity to develop the hardware part of the seismic subsystem of the Large-Scale Research Facilities functioning at the Federal Research Center of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences to study seismic signals in groundwater pressure changes. For this purpose, the well monitoring on the territory of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula, was updated using Keller equipment, Switzerland (sensors of PAA36 XiW CTD Si, PAA36 XiW modifications, data logger GSM-2), Campbell Scientific Inc, USA (CR6 and CR1000 data loggers) and a budgetary hydrogeodynamic data recorder (HDDR) based on the STK-1 minicomputers, created at the Kamchatka Branch of the GS RAS. A description has been provided concerning the sets of digital equipment installed in four wells for precise recording of groundwater pressure variations with a frequency of 20.00–0.08 Hz. Consideration is being given to the characteristics of the equipment installed in individual wells and to the problems solved in the process of updating the well observation system in order to study vibration effects and hydrogeodynamic precursors of earthquakes. The paper presents the newly obtained results of recording the high-frequency variations in groundwater pressure in wells during the 2020–2021 local and remote earthquakes. A discussion is provided of new possibilities for studying vibration effects on changes in ground water pressure with a frequency comparable to the frequency of recording seismic events by seismometric equipment. Using a new equipment for recording water pressure in the unique well E-1 made it possible to record, a hydrogeodynamic precursor in real time before the March 16, 2021, $M_w=6.6$ earthquake which occurred at the epicentral distance of 350 km from the well.

KEYWORDS: well; water level; groundwater pressure; earthquake; seismic waves; well equipment; hydrogeodynamic precursors

FUNDING: The work was performed with the support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment 075-00576-21 with the use of the data obtained from the Large-Scale Research Facilities "Seismic and infrasonic monitoring of the Arctic cryolite zone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent areas and the world".

RESEARCH ARTICLE

Received: December 7, 2021

Revised: January 14, 2022

Accepted: January 20, 2022

Correspondence: Galina N. Kopylova, gala@emsd.ru

FOR CITATION: Boldina S.V., Kopylova G.N., Kobzev V.A., 2022. Study of Seismic Effects on Changes in Groundwater Pressure: Equipment and Some Well Observation Results for the Kamchatka Peninsula. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0594. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0594

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИЗМЕНЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД: АППАРАТУРА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

С.В. Болдина, Г.Н. Копылова, В.А. Кобзев

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

АННОТАЦИЯ. Актуальность работы определяется необходимостью развития аппаратурной части сейсмической подсистемы уникальной научной установки, функционирующей в Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), для исследования сейсмических сигналов в изменениях давления подземных вод. Для этой цели выполнена модернизация системы скважинных наблюдений на территории Петропавловск-Камчатского полигона с использованием аппаратуры Keller, Швейцария (датчики модификаций PAA36 XiW CTD Si, PAA36 XiW, регистратор GSM-2), Campbell Scientific Inc, США (регистраторы CR6 и CR1000), и регистратора гидрогеодинамических данных наблюдений (РГДН) на основе мини-компьютеров типа STK-1, созданного в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН. Представлено описание комплектов цифрового скважинного оборудования для прецизионной регистрации вариаций давления подземных вод с частотой 20.00–0.08 Гц, установленных в четырех скважинах. Рассматриваются задачи, решаемые в процессе модернизации системы скважинных наблюдений с целью изучения вибрационных эффектов и гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Представлены результаты регистрации высокочастотных вариаций давления подземных вод в скважинах при местных и удаленных землетрясениях 2020–2021 гг., полученных с использованием установленного оборудования. Обсуждаются вопросы новых возможностей в изучении вибрационных эффектов в изменениях давления подземной воды с частотой, сопоставимой с частотой регистрации сейсмических событий сейсмометрическим оборудованием. С использованием нового оборудования для регистрации давления воды в уникальной скважине Е-1 в режиме реального времени был зарегистрирован гидрогеодинамический предвестник перед землетрясением 16 марта 2021 г., $M_w=6.6$, произошедшим на эпицентральной дистанции 350 км от скважины.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: скважина; уровень воды; давление подземных вод; землетрясение; сейсмические волны; скважинное оборудование; гидрогеодинамический предвестник

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 075-00576-21 с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

1. ВВЕДЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) с 2010 г. обеспечивает функционирование уникальной научной установки «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (УНУ СИЗК МАК). Указанная УНУ широко используется при проведении научных исследований в науках о Земле (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>). Аппаратурная часть УНУ СИЗК МАК включает в себя сейсмическую подсистему, состоящую из 264 цифровых широкополосных и короткопериодных станций на территории Российской Федерации, которая обеспечивает регистрацию сигналов от различных сейсмических источников в диапазоне частот от 0.003 до 100 Гц.

Ряд направлений научных исследований, проводимых с использованием сейсмической подсистемы УНУ

СИЗК МАК, таких как разработка новых средств и методов исследования недр Земли и гидросферы, анализ и прогнозирование сейсмической обстановки в сейсмоопасных и сейсмоактивных регионах и др., предполагают расширение ее аппаратурной части с учетом научно-технического прогресса и новых вызовов во взаимодействии человека, природы и технологий. В частности, в современной научной литературе широко обсуждаемым вопросом является многообразие откликов физико-химических параметров подземных вод при подготовке сильных землетрясений и при динамическом воздействии сейсмических волн, излучаемых из очагов землетрясений. Такие эффекты диагностируются главным образом при проведении наблюдений в скважинах [Barabanov et al., 1987; Boldina, Kopylova, 2017; Kopylova, Boldina, 2019a, 2020a, 2020b; Brodsky et al., 2003; Roeloffs, 1998; Wang, Manga, 2010, 2021]. Следует отметить, что достоверных данных об эффектах на стадиях подготовки землетрясений, называемых гидрогеодинамическими и гидрогеохимическими предвестниками, сравнительно немного. В то же время

многочисленные проявления гидрогеосейсмических вариаций (далее ГГСВ) в изменениях давления, разгрузки, температуры и химического состава подземных вод и газов при вибрационном воздействии сейсмических волн на подземные водоносные системы – традиционный компонент описания последствий сильных и средних землетрясений в сейсмоактивных регионах мира [Wang, Manga, 2010, 2021].

Как показано в работе [Kopylova, Boldina, 2020b], характерным свойством гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников является их приуроченность к ближней и средней зонам очагов сильных землетрясений ($M \geq 5$), ограниченными расстояниями не более десятков – первых сотен километров от эпицентров, т.е. такие эффекты при наблюдениях в скважинах имеют строго локализованное проявление и контролируются зонами очагов будущих землетрясений.

В то же время вибрационные эффекты сейсмических волн при сильных землетрясениях могут проявляться в изменениях давления подземных вод на расстояниях до тысяч километров, а при землетрясениях с величиной магнитуды 8–9 – повсеместно на Земле. При одном и том же землетрясении различные эффекты вибрационного воздействия сейсмических волн в форме колебаний (осцилляций), понижений и повышений давления подземных вод могут проявляться в близко расположенных скважинах, что показывает существенную роль мезо- и микронеоднородностей строения и состава водовмещающих пород, распределения напоров и фильтрационных потоков в проявлениях откликов давления на вибрационное воздействие сейсмических волн. Объяснение многообразия таких откликов на основе адекватных моделей гидрогеодинамических процессов в системе скважина – водовмещающая порода является важной научной задачей, решение которой будет способствовать развитию новых методов и технологий проведения мониторинговых исследований в сейсмоактивных регионах и прогнозирования сильных землетрясений с использованием гидрогеологических, геофизических и геохимических наблюдений.

Район работ и наблюдательные скважины. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН проводит на территории Петропавловск-Камчатского полигона (полуостров Камчатка) автоматизированные наблюдения за давлением, температурой и электропроводностью подземной воды в скважинах Ю3-5, Е-1, М-1 и 1303, вскрывающих скальные водовмещающие породы на глубине 310–717 м (рис. 1).

В монографии [Kopylova, Boldina, 2019b] и в работах из списка литературы к ней представлены исчерпывающие данные о строении скважин, геологических разрезах, фильтрационных и упругих свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и зарегистрированных гидрогеодинамических предвестниках, косейсмических эффектах и вариациях уровня/давления воды при местных и телесейсмических землетрясениях.

О причинах многообразия вибрационных эффектов в изменениях давления подземных вод. По данным равномерных наблюдений в скважине Ю3-5 (рис. 1) с периодичностью 5 мин были выделены четыре типа откликов давления подземной воды при землетрясениях с $M_w = 6.8–9.1$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 80–14600$ км и рассмотрены модели их формирования [Kopylova, Boldina, 2020a]. В указанной работе, с использованием широкополосных записей землетрясений на ближайшей сеймостанции РЕТ (рис. 1), продемонстрирована зависимость проявления различных типов откликов от амплитудно-частотного состава сейсмических волн и параметров интенсивности их воздействия в районах наблюдательных скважин, таких как удельная плотность сейсмической энергии и максимальная скорость сейсмических волн.

На примере скважины Ю3-5 с известными строением, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород было убедительно продемонстрировано, что разнообразие откликов давления подземной воды на динамическую деформацию водовмещающих пород определяется инициацией различных гидрогеодинамических процессов в системе скважина – водовмещающая порода, которые могут сопровождаться колебаниями,

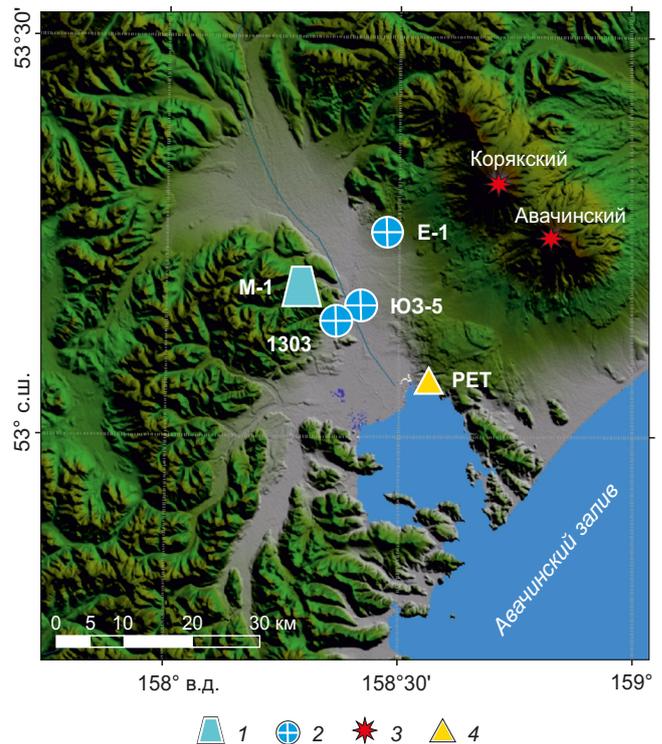


Рис. 1. Схема расположения наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка. 1 – самоизливающаяся скважина; 2 – пьезометрическая скважина; 3 – действующие вулканы; 4 – сеймостанция Петропавловск (РЕТ).

Fig. 1. A location of observation wells on the territory of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula. 1 – flowing well; 2 – piezometric well; 3 – active volcanoes; 4 – Petropavlovsk (PET) seismic station.

повышением или понижением давления различной продолжительности, в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных фаз сейсмических волн. Ведущими факторами, вызывающими разнообразие эффектов вибрационного изменения давления (напора) подземных вод, являются вертикальные смещения ствола скважины и усиление вариаций давления на определенных резонансных частотах сейсмического воздействия [Cooper et al., 1965; Kopylova, Boldina, 2007], перераспределение локальных вариаций давления в водовмещающей породе вследствие неоднородности ее строения и, соответственно, неоднородного изменения поля давления подземных вод вблизи ствола скважины на расстояниях от первых метров до сотен метров [Kopylova, Boldina, 2020a; Brodsky et al., 2003; Roeloffs, 1998].

Определенный вклад в многообразие откликов давления при воздействии сейсмических волн также вносит различие упругих свойств подземной воды [Kopylova, Boldina, 2012; Roeloffs, 1998]. Присутствие свободного газа значительно повышает сжимаемость подземной воды, и величина коэффициента Скемптона, равная отношению изменений давления воды к общему напряжению в скелете породы, резко уменьшается. В таких случаях, в частности в скважине E-1, полуостров Камчатка, и в скважине BV, Калифорния, США, вибрационные эффекты проявляются исключительно в монотонных повышениях уровня (давления) воды в течение суток – десятков суток после сильных землетрясений.

Таким образом, многообразие откликов давления подземных вод в скважинах на прохождение сейсмических волн можно объяснить комплексом локальных факторов проведения наблюдений в скважинах, включающих различие их технических конструкций, упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород, а также особенностей структуры неоднородностей строения водовмещающих пород и пространственного распределения их свойств. Это обстоятельство предполагает создание моделей вибрационного воздействия на основе прецизионных данных наблюдений за вариациями давления подземных вод для каждой наблюдательной скважины, используемой в системе геофизического мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений. Для решения этой задачи в 2017–2021 гг. была выполнена модернизация системы наблюдений на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона (рис. 1) с использованием цифровых средств прецизионной регистрации давления подземных вод с частотой от 20 до 0.008 Гц (периоды от 0.05 с до 2 мин).

В работе представлено описание установленных комплектов скважинного оборудования для регистрации давления подземных вод; приводятся характеристики оборудования и конкретные задачи, решаемые в процессе модернизации. Рассмотрены некоторые результаты регистрации высокочастотных вариаций давления подземных вод при местных и удаленных землетрясениях, полученных с использованием нового оборудования. Показано, что регистрация вибрационных

эффектов в изменениях давления подземной воды с частотой, сопоставимой с частотой регистрации сейсмических событий сейсмометрическим оборудованием, дает новые возможности в их изучении.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВЛЕННЫХ КОМПЛЕКТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Цифровые наблюдения за вариациями уровня воды в скважинах Ю3-5 и E-1 с периодичностью 5–10 мин проводятся КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. [Kopylova, Boldina, 2019b]. В работе [Kopylova, Boldina, 2020a] было показано, что интервал регистрации уровня воды в 5–10 мин с использованием ультразвукового датчика уровня воды и универсальных регистраторов серии Кедр А2 и Кедр ДМ (ООО «Полином», г. Хабаровск) [Kopylova et al., 2017] позволяет уверенно выделять ГГСВ и оценивать их параметры – амплитуду и продолжительность лишь при монотонных изменениях давления воды в течение времени часы – сутки. Вместе с тем такая периодичность наблюдений не обеспечивает достоверные оценки амплитуд и продолжительностей ГГСВ, проявляющихся в вынужденных колебаниях уровня воды во время вступления сейсмических волн и в свободных затухающих колебаниях после прохождения сейсмических волн. По 10- и 5-минутным записям ГГСВ было возможным лишь констатировать факт наличия таких вариаций по увеличению их амплитуды, присутствию в записях уровня характерных «пиков» и приблизительно оценивать их амплитуду и продолжительность.

Модернизация скважинного оборудования 2017–2021 гг. была направлена, в первую очередь, на преодоление этого недостатка системы наблюдений. Кроме этого, в процессе модернизации предполагалось обеспечивать передачу данных наблюдений в режиме онлайн или в близком к онлайн для оперативной обработки данных, а также использовать автономные источники электропитания на солнечных батареях [Kobzev et al., 2021; Kobzev, Korkina, 2021].

В табл. 1 приводится характеристика скважин и новых элементов оборудования, установленных в процессе модернизации. На рис. 2 представлены блок-схемы функционирующего оборудования на отдельных скважинах с элементами их технического строения.

Датчики. Основу оборудования, установленного в 2017–2021 гг. на скважинах Ю3-5, E-1, M-1 и 1303, составляют миниатюрные однотипные погружные высокочувствительные датчики фирмы Keller, Швейцария, двух модификаций:

- PAA36 XiW CTD Si для измерения давления, температуры и электропроводности воды (рис. 3, а);
- PAA36 XiW для измерения давления и температуры воды (https://keller.nt-rt.ru/images/manuals/36xiw_ru.pdf).

Выбор модификации датчика определялся задачей наблюдений на отдельных скважинах. В пьезометрических скважинах Ю3-5 и 1303, вскрывающих низкоминерализованные подземные воды, использовались

Таблица 1. Данные о наблюдательных скважинах и установленном оборудовании
Table 1. Observation wells and installed equipment data

Скважина	Коорд., с.ш./в.д.	Глубина, м; открытый интервал, м	Возраст, состав пород	Дебит Q, $\text{дм}^3/\text{с}$; уровень воды, h, м	Температура воды, $^{\circ}\text{C}$; минерализация воды, $\text{г}/\text{дм}^3$	Состав воды; состав газа	Состав оборудования, установленного в процессе модернизации (частота регистрации давления подземных вод)
М-1	53.18°/ 158.28°	600 310–313 407–410 553–556	N, туфы	Самоизлив, Q=1.5	16; 0.25	$\text{SO}_4\text{-Ca-Na}$; растворенный газ, N_2	С июля 2020 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)
Е-1	53.26°/ 158.48°	665 625–645	N, туфы	Пьезометрическая, h=28	10; 1.5	$\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$; свободный газ, $\text{N}_2\text{-CH}_4$	С июля 2020 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si и регистратор GSM-2 (2 мин)
ЮЗ-5	53.17°/ 158.41°	800 310–800	K_2 , алевролиты	Пьезометрическая, h=1.5	14; 0.45	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$; растворенный газ, N_2	С окт. 2017 по май 2019 г.: датчик PAA36 XiW и регистратор CR6 (10 и 40 Гц). С мая по окт. 2019 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si и регистратор GSM-2 (1 мин). С января 2020 г. по наст. время датчик PAA36 XiW и регистратор CR1000 (20 Гц).
1303	53.14°/ 158.36°	717 517–717	N, туфопесчаники	Пьезометрическая, h=25	14; 0.67	$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$; растворенный газ, N_2	С апреля 2021 г. датчик PAA-36XiW и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)

датчики PAA36 XiW для регистрации давления и температуры воды. В пьезометрической скважине Е-1, вскрывающей минеральные газонасыщенные воды, и в самоизливающей скважине М-1 использовались датчики PAA36 XiW CTD Si для контроля вариаций давления и изменений температуры и химического состава воды по величине ее электропроводности.

Характеристики датчиков:

- разрешающая способность датчика давления воды 0.002 гПа при погрешности измерения 0.05 %,
- разрешающая способность датчика температуры воды 0.001 $^{\circ}\text{C}$ при погрешности измерения 0.1 %,
- разрешающая способность датчика электропроводности 0.002 мСм/см при погрешности измерения 1 %.

На всех скважинах, кроме регистрации параметров подземных вод, осуществляются измерения атмосферного давления и температуры воздуха с периодичностью 5 мин.

Регистраторы. Использовались три варианта оборудования в качестве регистраторов данных измерений параметров подземных вод:

- регистраторы CR6 и CR1000 (рис. 3, б) производства Campbell Scientific Inc, США, обеспечивающие измерения давления с частотой до 100 Гц;
- регистратор GSM-2 производства Keller, Швейцария, обеспечивающий периодичность измерений от 1 мин и более (рис. 3, в);
- регистратор гидрогеодинамических данных наблюдений (далее РГДН) на основе миникомпьютеров типа STK-1, созданный в КФ ФИЦ ЕГС РАН [Kobzev, Korikina, 2021].

РГДН. Техническими особенностями миникомпьютеров типа STK-1 (рис. 3, г), которые позволяют их использование в качестве регистраторов цифровых

данных в условиях Петропавловск-Камчатского полигона, являются:

- малые габариты, отсутствие вращающихся узлов и деталей, наличие жесткого диска SSD;
- возможность подключения через USB порт периферийных устройств;
- стандартное ПО ОС Windows, позволяющее использовать специализированное ПО для датчиков Keller PAA-36 XiW CTD Si, PAA36 XiW, и возможность установки дополнительного стандартного и авторского ПО;
- расширенные коммуникативные возможности WiFi, Bluetooth, HDMI;
- возможность накопления данных на твердотельную память и их передачи посредством телекоммуникационных сетей;
- малое энергопотребление и сравнительно небольшая стоимость.

Сконфигурированные комплексы РГДН в составе миникомпьютеров и периферийного оборудования помещены в пылевлагозащитные боксы (рис. 3, д), вмещающие:

- миникомпьютер со встроенными модулями WiFi, Bluetooth и HDMI для подключения внешних устройств (монитор, планшет или ноутбук);
- конвертер Keller K-114 для подключения датчиков PAA36 XiW CTD Si и PAA36 XiW к миникомпьютеру посредством преобразования цифрового выхода RS485 датчика к цифровому входу USB миникомпьютера;
- карту памяти Micro SD объемом от 2 Гб для записи и накопления регистрируемых данных;
- 2-4 G USB LTE модем для передачи данных по каналам сотовой связи и дистанционного управления миникомпьютером;
- USB Splitter hub 4 port для подключения к миникомпьютеру периферийного оборудования;

– стабилизатор LM 2596 HW-411 для обеспечения электропитания миникомпьютера и периферийного оборудования.

Для обеспечения регистрации данных используется лицензионное программное обеспечение ControlCenter Series30 (CCS30), поставляемое фирмой Keller совместно

с датчиками. ПО CCS30 устанавливает связь с датчиком, который подключен к миникомпьютеру через конвертер К-114 (рис. 3, г), позволяет просматривать на экране подключаемого монитора данные регистрации параметров подземных вод в табличном и графическом представлении, накапливать и записывать их на

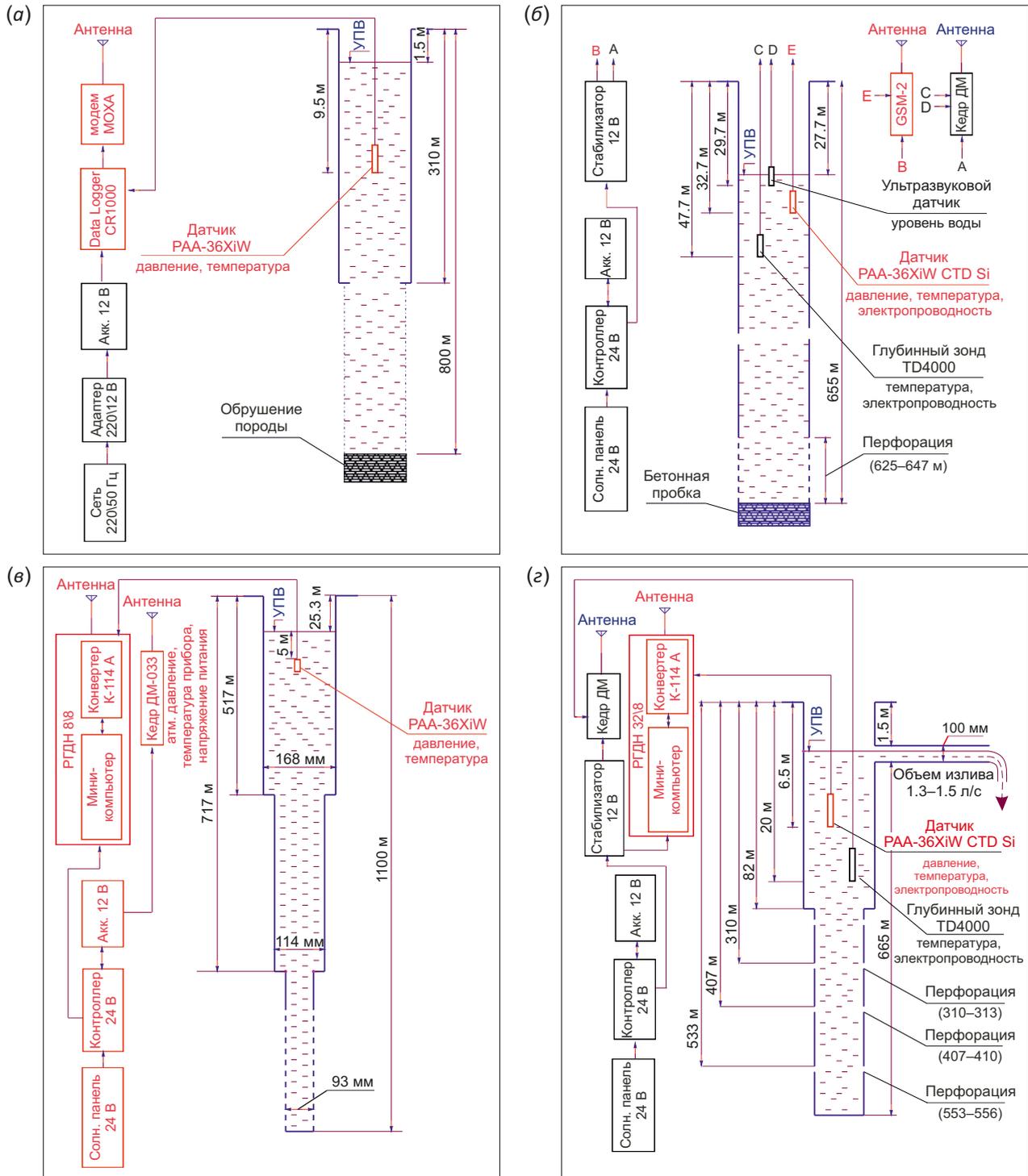


Рис. 2. Блок-схема оборудования скважин: (а) – Ю3-5; (б) – Е-1; (е) – 1303; (з) – М-1. Красным цветом показаны элементы, установленные в процессе модернизации.

Fig.2. A block-diagram for equipment of the wells: (а) – Ю3-5; (б) – Е-1; (е) – 1303; (з) – М-1. Red colors show the elements installed during updating.

твердотельную память, а также экспортировать в формате текстовых файлов и Excel.

Всего было изготовлено три комплекта РГДН, отличающихся друг от друга объемом внутренней памяти миникомпьютера и версией ОС Windows. Два комплекта обеспечивают регистрацию, накопление и передачу данных с частотой 1 Гц на скважинах 1303 (см. рис. 2, в) и М-1 (см. рис. 2, г).

На скважине Ю3-5 (см. рис. 2, а) обрабатывался вариант технического и программного совмещения датчика PAA 36XiW с регистраторами CR6 и CR1000 для измерений давления подземной воды с частотой 10–40 Гц. В сентябре 2017 г. – мае 2019 г. с использованием регистратора CR6 проводились измерения давления воды на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц с накоплением данных на твердотельную память. В 2018 г. здесь

испытывался комплект аппаратуры в составе датчика PAA36XiW, установленного на глубине 8 м ниже уровня воды, и регистратора GSM-2. Обеспечивалась периодичность измерений 2 мин с накоплением данных на твердотельную память и их передача по каналам сотовой связи на сервер КФ ФИЦ ЕГС РАН.

С 2020 г. в скважине Ю3-5 проводится регистрация давления и температуры воды на глубине 8 м с частотой 20 Гц с использованием датчика PAA 36XiW и регистратора CR1000 (см. рис. 2, а; рис. 3, б) с передачей данных в режиме онлайн по каналам сотовой связи на сервер КФ ФИЦ ЕГС РАН.

На скважине Е-1 (см. рис. 2, б) в июле 2020 г. дополнительно к комплекту оборудования для измерений уровня воды Кедр ДМ [Kopylova et al., 2017] было установлено оборудование в составе датчика PAA36 XiW CTD Si

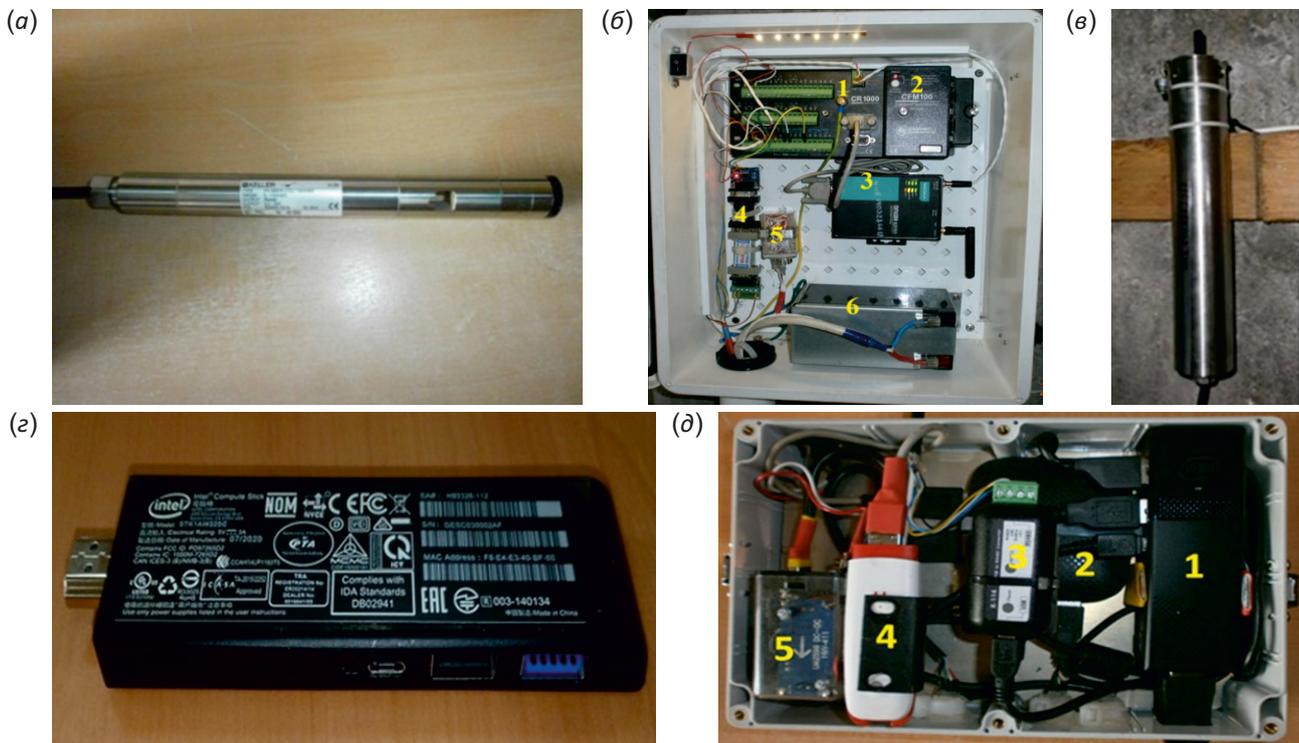


Рис. 3. Элементы оборудования, установленного на наблюдательных скважинах.

(а) – датчик давления, температуры и электропроводности воды PAA36 XiW CTD Si (длина 24 см, диаметр 2.2 см); (б) – регистратор данных CR1000 Campbell Scientific Inc, США, с встроенными датчиками атмосферного давления и температуры воздуха в защитном кожухе, скважина Ю3-5: 1 – программируемый регистратор CR1000 с встроенным датчиком температуры воздуха, 2 – CF-модуль для карты памяти, 3 – модем, 4 – конвертер, преобразующий цифровой выход RS485 датчика к цифровому входу RS232 регистратора, 5 – датчик атмосферного давления, 6 – аккумулятор 12 В; (в) – автономный регистратор данных GSM-2 Keller, Швейцария (высота 33 см, диаметр 4.8 см), скважина Е-1; (г) – миникомпьютер BOX STK1A32SC 32GB (длина 12.5 см, ширина 3.8 см, высота 1.5 см); (д) – бокс РГДН (длина 22 см, ширина 14.5 см, высота 8 см): 1 – миникомпьютер с ОС Windows 8 (з), 2 – USB Splitter hub 4 port, 3 – конвертер Keller K-114, 4 – модем 2-4 G USB LTE, 5 – стабилизатор LM 2596 HW-411.

Fig. 3. Elements of equipment installed in the observation wells.

(a) – water pressure, temperature and electrical conductivity sensor PAA36 XiW CTD Si (24 cm in length, 2.2 cm in diameter); (б) – data recorder CR1000 Campbell Scientific Inc, USA with built-in atmospheric pressure and air-temperature sensors in a protective box, well Ю3-5: 1 – programmable recorder CR1000 with a built-in air-temperature sensor, 2 – CF-module for memory card, 3 – modem, 4 – a converter that converts RS485 signals into RS232 signals, 5 – atmospheric pressure sensor, 6 – an accumulator 12 V; (в) – an autonomous recording unit GSM-2 Keller, Switzerland (33 cm in height, 4.8 cm in diameter), well Е-1; (г) – minicomputer BOX STK1A32SC 32GB (12.5 cm in length, 3.8 cm in width, 1.5 cm in height); (д) – box PGN (22 cm in length, 14.5 cm in width, 8 cm in height): 1 – minicomputer with OC Windows 8 (з), 2 – USB Splitter hub 4 port, 3 – converter Keller K-114, 4 – modem 2-4 G USB LTE, 5 – stabilizer LM 2596 HW-411.

и регистратора GSM-2 для измерения давления, температуры и электропроводности воды на глубине 6 м ниже уровня воды.

Необходимость установки дополнительного оборудования на этой скважине была обусловлена тем, что ООО «Полином» (г. Хабаровск) прекратило производство ультразвуковых датчиков уровня воды, обеспечивающих чувствительность регистрации уровня ± 0.1 см водяного столба, и перешло на производство датчиков давления, чувствительность которых была примерно на порядок хуже (± 1 см). Из-за недостаточной чувствительности такие датчики не подходили для регистрации сигналов землетрясений в изменениях давления воды в этой скважине. Кроме этого, входящий в комплект поставки от ООО «Полином» глубинный зонд для измерений температуры и электропроводности подземной воды по своим характеристикам и результатам регистрации оказался недостаточно надежным для выделения сигналов землетрясений в изменениях этих параметров.

В самоизливающейся скважине М-1 (см. рис. 2, г) в июле 2020 г. дополнительно к оборудованию Кедр ДМ был установлен комплект аппаратуры в составе датчика PAA 36XiW CTD Si и РГДН на основе миникомпьютера Lenovo IdeaCentre Stick 300, Windows 8, в качестве

регистратора. На миникомпьютере было установлено программное обеспечение к датчику PAA 36XiW CTD Si для измерения давления, температуры и электропроводности воды на глубине 5 м с частотой 1 Гц.

В пьезометрической скважине 1303 (см. рис. 2, в) с мая 2021 г. проводятся измерения давления и температуры воды с частотой 1 Гц с использованием датчика PAA 36XiW, установленного на глубине 5 м. В качестве регистратора используется миникомпьютер Ultra-Slim Computer STCK1A8LFC, Windows 8, с программным обеспечением к датчику.

Энергообеспечение комплектов оборудования на скважинах Е-1, М-1 и 1303 осуществляется от смонтированных систем электропитания на основе солнечных панелей. Энергообеспечение на скважине ЮЗ-5 обеспечивается от электрической сети постоянного тока.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Записи высокочастотных сейсмических сигналов в изменениях давления подземных вод. На рис. 4, а, и 5, а, приводятся данные регистрации вариаций давления воды в скважине ЮЗ-5 при двух землетрясениях 2021 г., произошедших в Японии и в районе полуострова Камчатка, в сопоставлении с записями этих событий на ближайшей сейсмостанции РЕТ (см.

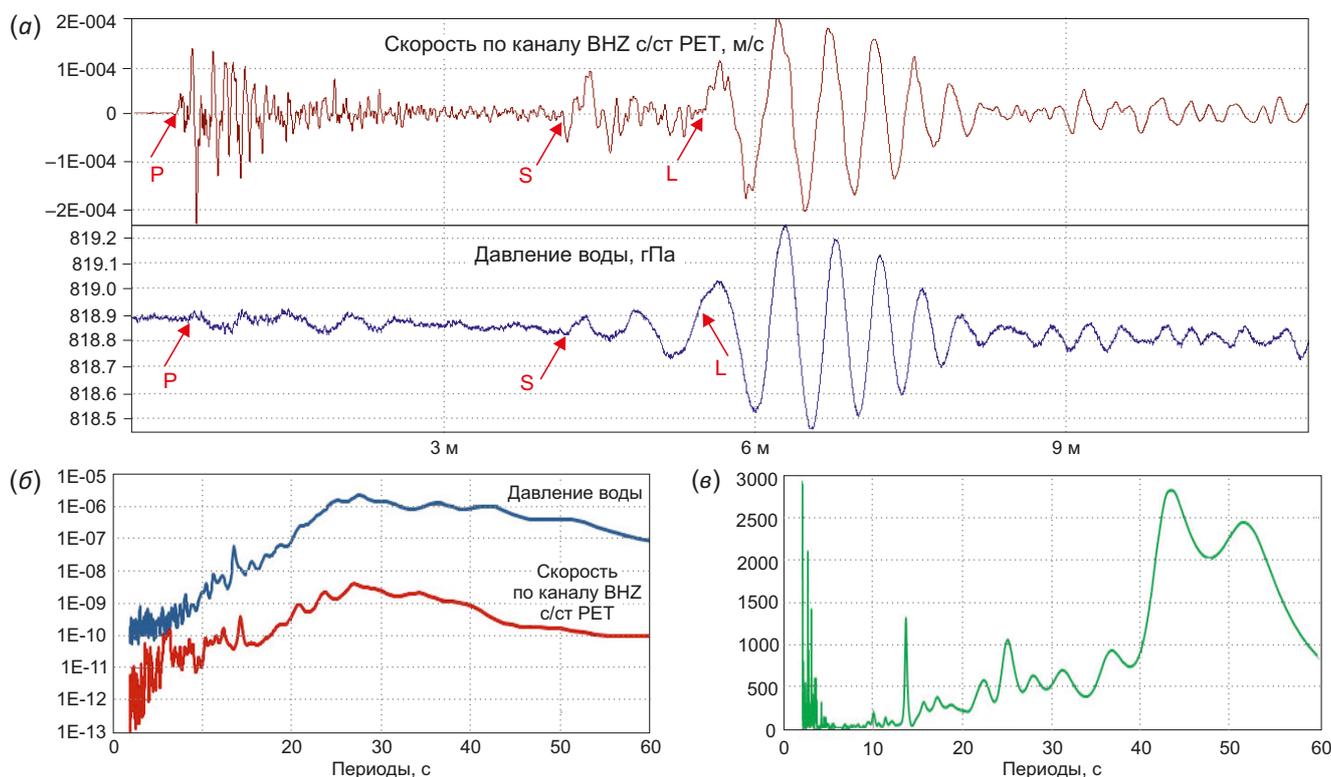


Рис. 4. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении в Японии 13 февраля 2021 г., $M_w=7.1$, эпицентральное расстояние $d_e=2150$ км, в сопоставлении с записью на канале ВНЗ на сейсмостанции РЕТ (датчик STS-1, 20 Гц) (а); спектры мощностей вариаций давления и сейсмического сигнала (б) и их отношение (в). Вступление сейсмических волн P, S и L показано красными стрелками.

Fig. 4. Water pressure variations in well ЮЗ-5 during the February 13, 2021, $M_w=7.1$ earthquake in Japan, epicentral distance $d_e=2150$ km, as compared to those recorded on VNZ component, PET station (sensor STS-1, 20 Hz) (a); power spectra of the variations in pressure and seismic signal (b) and their ratio (c). P, S and L wave arrivals are shown by red arrows.

рис. 1). Вступления сейсмических волн Р и S в записях давления воды хорошо выделяются и соответствуют временам вступления на сейсмостанции РЕТ. В случае удаленного землетрясения 13.02.2021 г. (Япония) в изменениях давления проявились поверхностные волны на периодах 20 с и более, идентичные сейсмической записи.

На рис. 4, б, и 5, б, представлены спектры сейсмических сигналов и вариаций давления воды, построенные методом максимальной энтропии Бурга. При построении спектров предварительно производился переход к частоте дискретизации 1 с путем усреднения исходных записей землетрясений с частотой 20 Гц в 20 раз. На рис. 4, в, и 5, в, представлены графики отношения спектра вариаций давления воды и спектра скорости вертикальных смещений земной поверхности.

В спектрах мощности максимальные амплитуды вариаций давления воды приходятся на периоды в десятки секунд, соответствующие периодам поверхностных волн. На графиках отношения спектров (см. рис. 4, в; рис. 5, в) наблюдается эффект усиления вариаций давления по отношению к скорости вертикальных смещений поверхности земли на периодах поверхностных волн при максимуме на резонансной частоте скважины 44 с [Kopylova, Boldina, 2007, 2020a]. На графике

отношения спектров для камчатского землетрясения (рис. 5, в) видно, что усиление вариаций давления воды также происходит на периоде резонансной частоты скважины 44 с, но со смещением в область меньших периодов (30–40 с), по сравнению с удаленным землетрясением в Японии, для которого максимум смещен в более низкочастотную область периодов 40–50 с (см. рис. 4, в). Наблюдаемое смещение максимумов отношения спектральных амплитуд вариаций давления и вертикальных скоростей движения земной поверхности в окрестности резонансной частоты скважины (44 с) может быть связано с особенностями фильтрационных процессов в системе скважина – водовмещающая порода при воздействии сейсмических волн от различных землетрясений. Выяснение особенностей спектральной структуры и механизмов формирования откликов давления подземных вод при различных землетрясениях будет предметом дальнейших исследований.

На рис. 6 представлены записи вариаций давления воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и М-1 с частотой 1 Гц при землетрясении с $M_w=8.2$, произошедшем на Аляске, в сопоставлении с записью на сейсмостанции РЕТ. Записи вариаций давления, полученные с использованием однотипных датчиков и различных регистраторов (CR1000

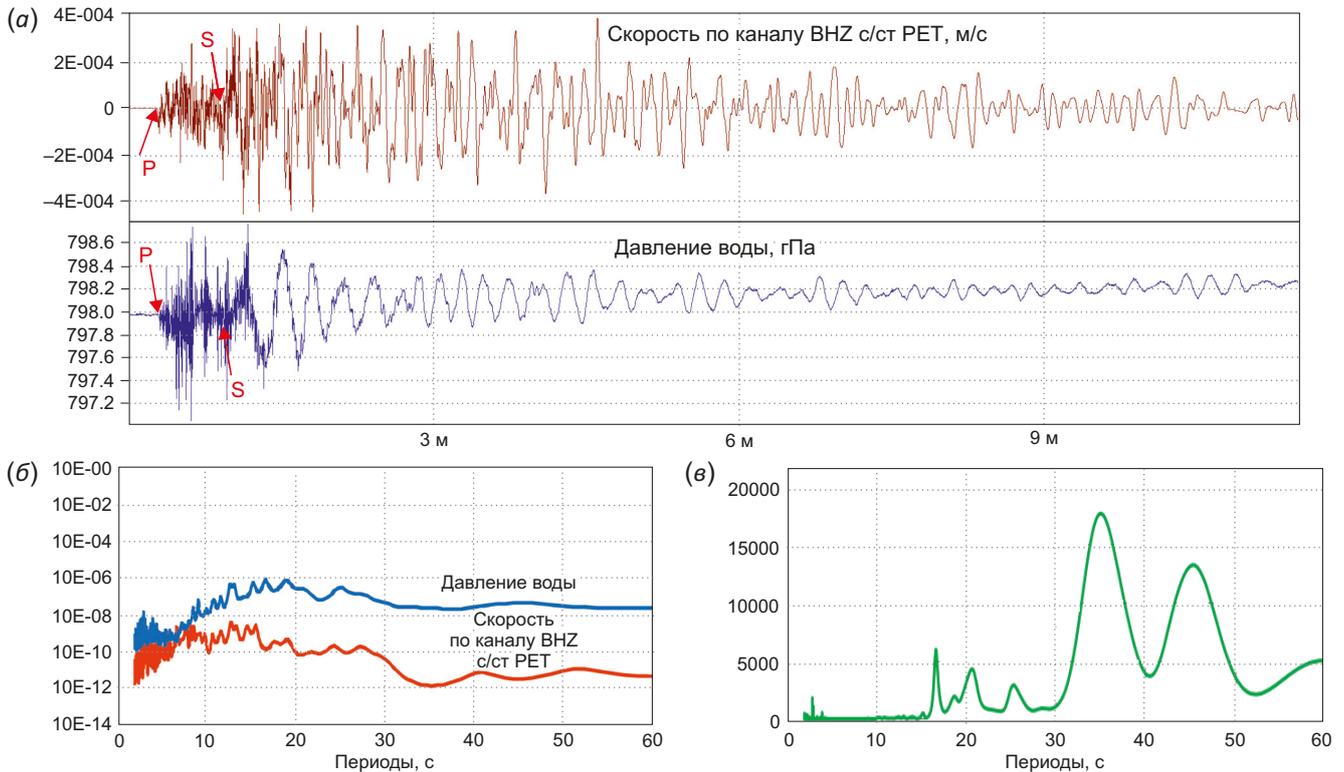


Рис. 5. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении в районе полуострова Камчатка 16 марта 2021 г., $M_w=6.6$, $d_e=350$ км, в сопоставлении с записью на канале BHZ на сейсмостанции РЕТ (датчик STS-1, 20 Гц) (а); спектры мощности вариаций давления и сейсмического сигнала (б) и их отношение (в). Вступление сейсмических волн Р и S показано красными стрелками.

Fig. 5. Water pressure variations in well ЮЗ-5 during the March 16, 2021, $M_w=6.6$ earthquake near the Kamchatka Peninsula, $d_e=350$ km, as compared to those recorded on BHZ component, PET station (sensor STS-1, 20 Hz) (a); power spectra of the variations in pressure and seismic signal (b) and their ratio (c). P and S wave arrivals are shown by red arrows.

и РГДН), являются идентичными сейсмической записи по составу и временам вступления P-, S-, L-волн.

Особенности модернизации оборудования на уникальной скважине Е-1 (см. рис. 1, 2, 6; табл. 1). Наблюдения на скважине Е-1 проводятся с 1987 г., и для нее установлена повышенная чувствительность к процессам подготовки тектонических землетрясений и к активизации магматических очагов в районе Авачинской группы вулканов [Kopylova, Boldina, 2012, 2020b, 2021]. В скважине Е-1 гидрогеодинамический предвестник в изменениях уровня воды (ГП) проявляется как перед сильными ($M_w \geq 6.6$), так и перед средними по силе землетрясениями ($M_w = 5.0-6.5$). При этом степень связи проявлений ГП перед землетрясениями увеличивается с ростом величины магнитуды: ГП проявлялся в 50 % случаев перед событиями с $M_w = 5.0-6.5$ и в 100 % случаев перед землетрясениями с $M_w = 6.6-7.8$ [Kopylova, Boldina, 2020b].

В изменениях среднесуточной скорости давления по данным наблюдений в режиме реального времени были выделены ГП с выдачей заблаговременных прогнозов семи землетрясений 2001–2016 гг. с $M_w = 5.3-7.2$ в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, которые были признаны

оправдавшимися по месту, времени и величине магнитуды.

За время наблюдений на этой скважине трижды происходила активизация ближних вулканов, в том числе эксплозивно-эффузивное извержение влк. Авачинского в январе 1991 г., гидротермально-магматическое извержение влк. Корякского в декабре 2008–2009 гг. и усиление сейсмичности и фумарольной активности влк. Авачинского в октябре 2019 г. – марте 2020 г. В каждом случае перед активизацией наблюдалось повышение уровня в течение 3–4 лет, показывающее рост давления подземной воды с амплитудой 0.045–0.122 бар.

При модернизации оборудования на скважине Е-1 решались две задачи: (1) обеспечение минимального возмущения естественного режима формирования давления при непрерывном мониторинге гидрогеодинамических предвестников и эффектов активизации магматических очагов ближайших вулканов и (2) получение сопоставимых результатов регистрации давления двумя комплектами оборудования – Кедр ДМ и Keller (табл.1; см. рис. 2, 6).

Для решения первой задачи испытания комплекта оборудования Keller проводились в лаборатории на имитаторе скважины и в полевых условиях на скважине

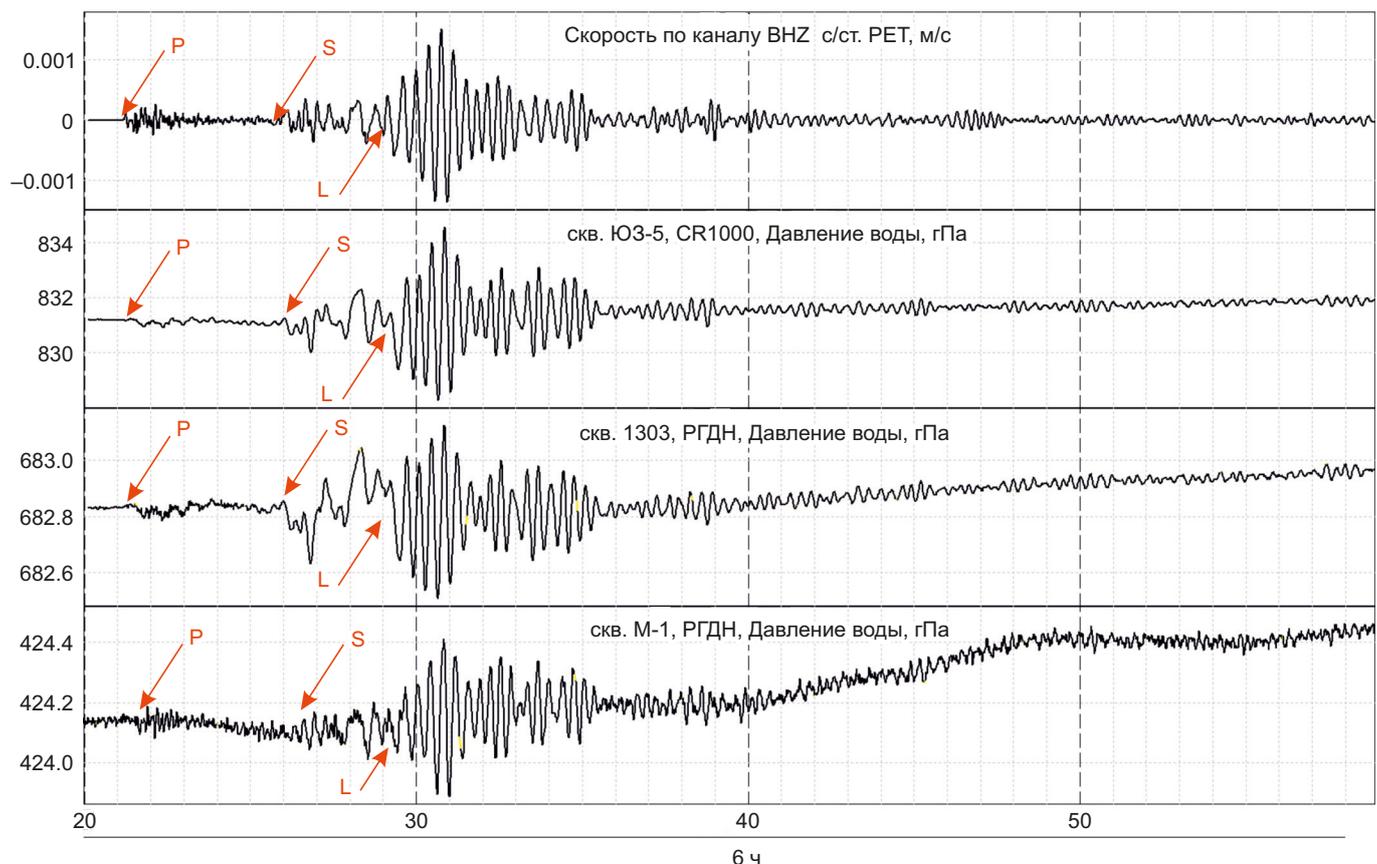


Рис. 6. Изменения давления воды в скважинах Ю3-5, 1303 и М-1 при землетрясении 29.07.2021 г., $M_w = 8.2$, $d_e = 2870$ км, Аляска, в сопоставлении с сейсмической записью на канале ВНЗ на сейсмостанции РЕТ (датчик STS-1, 20 Гц). Вступления сейсмических волн P, S и L показаны красными стрелками.

Fig. 6. Water pressure variations in wells Ю3-5, 1303 and М-1 during the July, 29, 2021, $M_w = 8.2$ earthquake, Alaska, $d_e = 2870$ km, as compared to those recorded on BHZ component, PET station (sensor STS-1, 20 Hz. P, S and L wave arrivals are shown by red arrows.

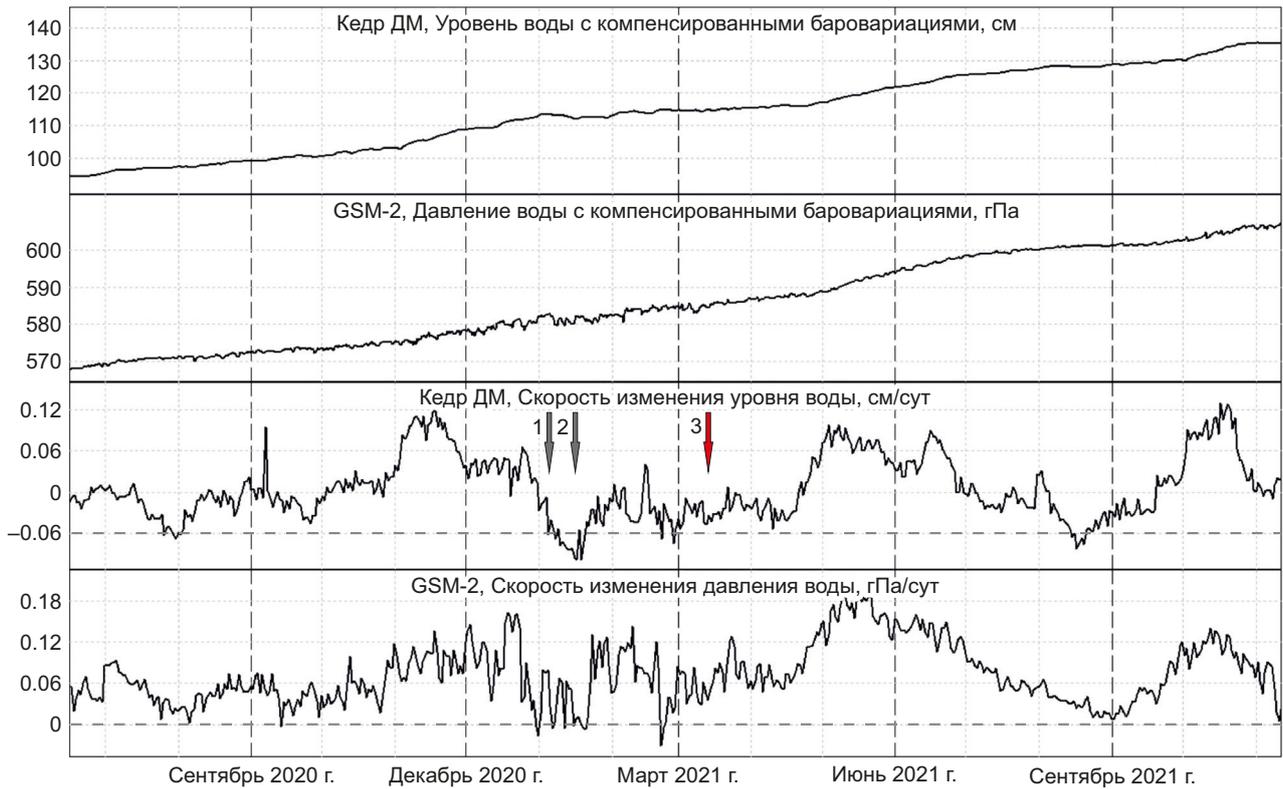


Рис. 7. Изменения уровня/давления воды в скважине Е-1 с 15.06.2020 г. по 11 ноября 2021 г. и суточные скорости их изменения по данным регистрации Кедр ДМ и комплектом оборудования в составе датчика PAA36 XiW CTD Si и регистратора GSM-2. Стрелками показаны: 1 – 5 января 2021 г., начало проявления гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды; 2 – 14 января 2021 г., дата подачи прогнозного заключения в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений; 3 – землетрясение 16 марта 2021 г., $M_w=6.6$, $d_e=350$ км. Горизонтальные пунктирные линии – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды.

Fig. 7. Water level/water pressure variations in well E-1 from June 15, 2020 to November 11, 2021, and the rates of their daily variations from the data recorded by Kedr DM and a set of equipment consisting of sensor PAA36 XiW CTD Si and recorder GSM-2. The arrows stand for: 1 – January 5, 2021, the beginning of manifestation of hydrogeological precursor of the water level variations; 2 – January 14, 2021, the date of submission of prediction conclusion to the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council of Earthquake Prediction; 3 – March 16, 2021, $M_w=6.6$ earthquake, $d_e=350$ km. Horizontal dashed lines show the threshold value of the rate of daily variations in water level.

ЮЗ-5, характеризующейся сравнительно быстрым восстановлением естественного гидрогеодинамического режима после установки датчика в ствол скважины. После успешных испытаний нового комплекта оборудования Keller он был установлен на скважине Е-1, и до настоящего времени проводятся синхронные наблюдения двумя комплектами.

На рис. 7 представлены изменения давления воды в скважине Е-1 по данным регистрации Кедр ДМ и с использованием датчика Keller PAA36 XiW CTD Si и регистратора GSM-2. Результаты синхронных измерений уровня воды и давления на глубине 6 м показывают одинаковые амплитуды роста давления воды за длительный период наблюдений. Изменения суточной скорости вариаций давления так же достаточно хорошо согласованы между собой (см. два нижних графика на рис. 7).

Землетрясение 16 марта 2021 г., $M_w=6.6$, произошло на эпицентральной расстоянии $d_e=350$ км от скважины Е-1. Перед ним был выявлен в режиме реального

времени ГП в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью, который начал проявляться с 5 января 2021 г. (цифра 1 на рис. 7). С использованием этого предвестника 14 января 2021 г. было подано прогнозное заключение в Камчатский филиал РЭС (цифра 2 на рис. 7) о возможности землетрясения с $M \geq (5.5 \pm 0.5)$ на расстоянии до 350 км от скважины в течение времени до двух месяцев. Произошедшее 16 марта 2021 г. землетрясение $M_w=6.6$ (цифра 3 на рис. 7) соответствовало поданному прогнозу по времени, удаленности и величине магнитуды.

Синхронные наблюдения двумя комплектами оборудования также подтвердили идентичность проявления ГП в изменениях уровня и в изменениях давления воды на глубине 6 м в стволе скважины Е-1.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная в 2017–2021 гг. модернизация системы наблюдений на четырех скважинах Петропавловск-Камчатского полигона с использованием прецизионного

цифрового оборудования позволяет проводить детальное исследование вибрационных эффектов в изменениях давления подземных вод при прохождении сейсмических волн от землетрясений в широком диапазоне магнитуд и эпицентральных расстояний.

Особенностью проводимого эксперимента является использование различных комплектов оборудования для измерений давления подземных вод в скважинах, в т.ч. бюджетного варианта регистратора РГДН, созданного в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Использование комплектов оборудования от ведущих мировых производителей совместно с РГДН повышает обоснованность выделения и последующего изучения вибрационных эффектов в высокочастотных вариациях давления подземных вод в различных скважинах в зависимости от их конструкции, свойств и строения водовмещающих пород.

Перспективы дальнейших исследований на основе созданной системы скважинных наблюдений связаны с накоплением достоверных данных о высокочастотных откликах давления подземных вод в наблюдательных скважинах сети при прохождении сейсмических волн от землетрясений в широких диапазонах магнитуд и эпицентральных расстояний и их использованием при создании моделей вибрационного воздействия для отдельных скважин. Расширенное исследование высокочастотных эффектов изменения давления в отдельных скважинах позволит в дальнейшем рассматривать вибрационное воздействие сейсмических волн в качестве природных зондирующих сигналов состояния наблюдательных систем скважина – водовмещающая порода с возможностью оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и мониторинга их изменчивости во времени, а также поиска новых видов гидрогеодинамических предвестников сильных землетрясений.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

6. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Barabanov V.L., Grinevsky A.O., Kissin I.G., Nikolaev A.V., 1987. On Some Aspects of the Effect of Seismic Vibrations on Water-Saturated Environment. Their Comparison with the Effects of Distant Large Earthquakes. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 207 (1), 52–56 (in Russian) [Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Николаев А.В. О

некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений // Доклады АН СССР. 1987. Т. 297. № 1. С. 52–56].

Boldina S.V., Kopylova G.N., 2017. Effects of the January 30, 2016, $M_w=7.2$ Zhupanovsky Earthquake on the Water Level Variations in Wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 863–880 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>.

Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M., 2003. A Mechanism for Sustained Groundwater Pressure Changes Induced by Distant Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B8), 2390. <https://doi.org/10.1029/2002JB002321>.

Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R., 1965. The Response of Well-Aquifer System to Seismic Waves. *Journal of Geophysical Research* 70 (16), 3915–3926. <https://doi.org/10.1029/JZ070i016p03915>.

Kobzev V.A., Boldina S.V., Korkina G.M., Dolgikh V.P., 2021. Technical Support for KB GS RAS Well Equipment Updating in 2017–2020. In: *The Problems of an Integrated Geophysical Monitoring of Seismically Active Areas. Proceedings of the Eighth All-Russia Scientific and Technical Conference with an International Participation (September 26 – October 2, 2021)*. Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 396–400 (in Russian) [Кобзев В.А., Болдина С.В., Коркина Г.М., Долгих В.П. Техническое обеспечение модернизации скважинного оборудования КФ ФИЦ ЕГС РАН в 2017–2020 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды Восьмой всероссийской научно-технической конференции с международным участием (26 сентября – 2 октября 2021 г.). Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 396–400]. <https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.75>.

Kobzev V.A., Korkina G.M., 2021. An Experience in the Use of STK-1 Minicomputer for the Well Observations. In: *The Problems of an Integrated Geophysical Monitoring of Seismically Active Areas. Proceedings of the Eighth All-Russia Scientific and Technical Conference with an International Participation (September 26 – October 2, 2021)*. Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 401–404 (in Russian) [Кобзев В.А., Коркина Г.М. Опыт использования миникомпьютера типа STK-1 при проведении наблюдений в скважинах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды Восьмой всероссийской научно-технической конференции с международным участием (26 сентября – 2 октября 2021 г.). Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 401–404]. <https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.76>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2007. The Response of Water Level in the YuZ-5 Well, Kamchatka to the Magnitude 9.3, Sumatra–Andaman Earthquake of December 26, 2004. *Journal*

of Volcanology and Seismology 1 (5), 319–327. <https://doi.org/10.1134/S0742046307050041>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2012. On the Relationships of Water-Level Variations in the E-1 Well, Kamchatka to the 2008–2009 Resumption of Activity on Koryakskii Volcano and to Large ($M \geq 5$) Earthquakes. *Journal of Volcanology and Seismology* 6 (5), 316–328. <https://doi.org/10.1134/S074204631205003X>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2019a. Hydrogeoseismological Research in Kamchatka: 1977–2017. *Journal of Volcanology and Seismology* 13 (2), 71–84. <https://doi.org/10.1134/S074204631205003X>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2019b. Hydrogeoseismic Variations in Water Level of the Wells in Kamchatka. Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky, 144 p. (in Russian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019b. 144 с.].

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2020a. Effects of Seismic Waves in Water Level Changes in a Well: Empirical Data and Models. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56 (4), 530–549. <https://doi.org/10.1134/S1069351320030039>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2020b. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula. *Frontiers in Earth Science* 8, 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., 2021. Hydrogeological Precursors of Earthquakes and Volcanic Activations According to Observation Data in Kamchatka Peninsula Wells. *Earth Sciences and Subsoil Use* 44 (2), 141–150 (in Russian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 2. С. 141–150]. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>.

Kopylova G.N., Boldina S.V., Smirnov A.A., Chubarova E.G., 2017. 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* 53, 286–295. <https://doi.org/10.3103/S0747923917040065>.

Roeloffs E.A., 1998. Persistent Water Level Changes in a Well near Parkfield, California, due to Local and Distant Earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103 (B1), 869–889. <https://doi.org/10.1029/97JB02335>.

Wang Ch.-Y., Manga M., 2010. *Earthquakes and Water*. Vol. 114. Springer, Berlin, Heidelberg, 225 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00810-8>.

Wang Ch.-Y., Manga M., 2021. *Water and Earthquakes*. Springer, Switzerland, 387 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9>.