



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.34+556.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>



Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка

© Г.Н. Копылова^a, С.В. Болдина^b

^{a,b}Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба
Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Резюме: Цель работы заключалась в представлении результатов обобщения данных о проявлениях гидрогеологических предвестников землетрясений и активизаций вулканов по многолетним наблюдениям в скважинах, расположенных в восточных районах полуострова Камчатка. Основным рассматриваемым вопросом являлась связь проявлений гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах с величинами магнитуды M_w и эпицентрального расстояния землетрясений до скважин d_e , а также с параметрами сейсмического воздействия в районе наблюдений: удельной плотностью энергии сейсмических волн e и макросейсмической интенсивностью сотрясений I_{MSK-64} . В результате исследований выявлено, что гидрогеологические предвестники в двух-четырёх скважинах проявлялись в течение времени от одного до девяти месяцев перед наиболее сильными землетрясениями с магнитудами $M_w = 6,6–7,8$ на расстояниях $d_e = 90–300$ км. Такие землетрясения сопровождалось сотрясениями интенсивностью $I_{MSK-64} = 4–6$ баллов, и величины e при таких землетрясениях составляли не менее $0,1$ Дж/м³; гидрогеологические предвестники были приурочены к области, для которой величины отношения эпицентрального расстояния землетрясений d_e к максимальному линейному размеру очага землетрясения L составляли от 1 до 3,7. С использованием установленных связей между проявлениями гидрогеологических предвестников и параметрами землетрясений составляются еженедельные прогнозные заключения для экспертных советов по прогнозу землетрясений по данным текущих наблюдений в скважинах. В скважине, расположенной на расстоянии 15 и 20 км от действующих вулканов Корякского и Авача, проявлялся эффект аномального роста давления подземной воды перед извержениями 1991 и 2008–2009 гг. Таким образом, можно сделать вывод о том, что функционирующие технические средства наблюдений в скважинах, результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений и извержений вулканов, а также опыт их применения в работе экспертных советов составляют научно-технический базис разработки геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

Ключевые слова: скважина, гидрогеологические предвестники, землетрясение, вулкан, геоинформационная технология, полуостров Камчатка

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

Для цитирования: 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>

Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in Kamchatka Peninsula wells

© Galina N. Kopylova^a, Svetlana V. Boldina^b

^{a,b}Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: The purpose of the study is generalization of data on the manifestations of hydrogeological earthquake precursors and volcanic activations based on long-term observations in the wells of the eastern part of the Kamchatka Peninsula. The main problem under consideration is the connection between the manifestations of hydrogeological precursors in several wells with the values of the magnitude M_w and epicentral distance of earthquakes to the wells d_e as well as with



the parameters of seismic action in the observation area including specific density of seismic wave energy e and macro-seismic intensity of shaking I_{MSK-64} . The study results revealed that hydrogeological precursors in two-four wells had been manifesting for the period from 1 to 9 months before the strongest earthquakes with $M_w = 6.6–7.8$ at the epicentral distances $d_e = 90–300$ km. Such earthquakes were accompanied by the shakings of the intensity of $I_{MSK-64} = 4–6$ points. The specific density of seismic energy under such earthquakes was minimum 0.1 J/m^3 . The hydrogeological precursors were confined to the area for which the ratios of the earthquake epicentral distance d_e to the maximum linear size of the earthquake source L , km ranged from 1 to 3.7. Using the established relationships between the manifestations of hydrogeological precursors and earthquake parameters, weekly prognostic conclusions were made for expert earthquake prediction councils based on the data of current observations in wells. The well located at the distance of 15 and 20 km from the Koryaksky and Avacha active volcanoes featured the anomalous rise of groundwater pressure before the eruptions in 1991 and 2008–2009. Therefore, a conclusion can be drawn that observation equipment operating in wells, the study results of hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic eruptions as well as their application experience in the work of expert councils can form the scientific and technical basis for the development of geoinformation prediction technology for natural disasters in the Kamchatka Krai.

Keywords: well, hydrogeological precursors, earthquake, volcano, geoinformation technology, the Kamchatka Peninsula

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 075-00576-21 and the target program Development). The data were obtained through the use of the unique research facility “Seismic infrasound complex for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world”.

For citation: Kopylova GN, Boldina SV. Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in Kamchatka Peninsula wells. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):141–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150>

Введение

Рост населения и увеличение площади урбанизированных территорий в сейсмоактивных регионах Земли с проявлениями активного вулканизма вызывает необходимость создания надежных систем оценки сейсмической и вулканоопасности, а также обеспечения прогнозов сильных землетрясений и пароксизмальных извержений вулканов. К таким регионам относится территория полуострова Камчатка, расположенного в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (рис. 1, а). Здесь различными научными и производственными учреждениями проводятся многолетние исследования предвестников землетрясений и извержений вулканов. На основе таких предвестников создаются методы прогнозирования, которые используются в работе экспертных советов по прогнозу землетрясений и извержений вулканов [1, 2].

Автоматизированные системы регистрации различных видов предвестников и результаты исследования их связи с параметрами землетрясений и извержений вулканов рассматриваются нами в качестве научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф. Назначением данной технологии является ее

использование административными органами при осуществлении превентивных мероприятий и повышении качества управленческих решений в кризисных ситуациях, сопряженных с высокой вероятностью возникновения сильного землетрясения или извержения вулкана. Главными компонентами ее являются: автоматизированные системы наблюдений, передачи и обработки данных за параметрами полей Земли для оперативного выделения предвестников; научно обоснованные и апробированные на практике правила применения предвестников для прогнозирования землетрясений и извержений вулканов; система принятия решений о прогнозе катастрофического события, о доведении его до населения и осуществлении превентивных мероприятий.

Особенностью создания научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф является необходимость длительного (от нескольких лет до десятилетий) этапа мониторинговых исследований геофизических, геохимических, гидрогеологических, деформационных и других полей Земли и соответствующих видов предвестников. Причина преимущественно эмпирического и длительного по времени способа получения научного знания о предвестниках имеет объективный характер и заключа-



ется в редкости возникновения главных объектов прогнозирования – сильных землетрясений с катастрофическими последствиями и пароксизмальных вулканических извержений. В Камчатском регионе повторяемость опасных землетрясений с величинами магнитуд порядка 7–8 составляет от десятков до первых сотен лет, а периодичность пароксизмальных извержений вулканов Корякского и Авача, расположенных вблизи г. Петропавловска-Камчатского, – первые десятки лет [1]. С учетом высокой социальной и экономической значимости административных решений по прогнозам природных катастроф накопление научного знания о предвестниках, их свойствах и особенностях проявления в конкретном регионе не может подменяться гипотетическими представлениями о них. Поэтому опытно-экспериментальное применение

предвестников в практике прогнозирования землетрясений и извержений вулканов в реальном времени является необходимым этапом проверки и верификации всех видов предвестников.

В настоящей работе представлены результаты обобщения данных о гидрогеологических предвестниках (ГП) землетрясений в пяти наблюдательных скважинах Петропавловск-Камчатского полигона, расположенного на полуострове Камчатка (рис. 1, б), с использованием материалов из ранее опубликованных работ авторов [3–8] и других исследователей [9–11]; дана оценка современного состояния гидрогеологического метода как потенциального элемента научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

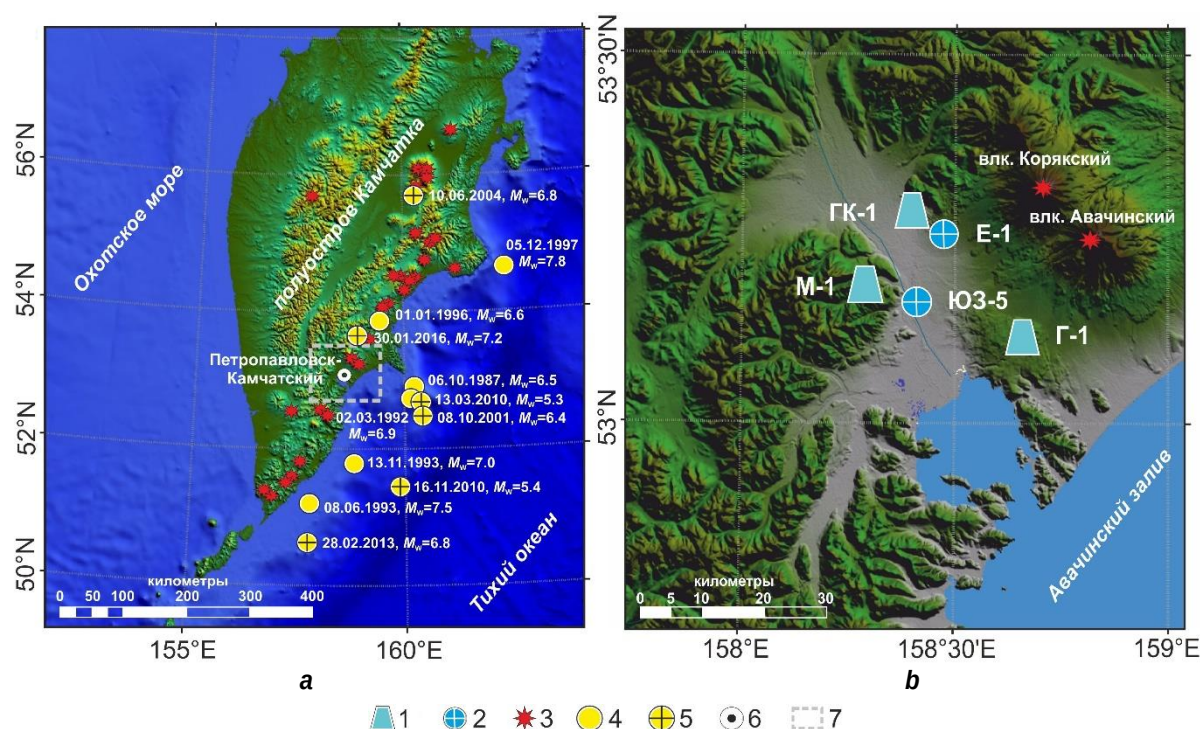


Рис. 1. Схемы расположения эпицентров землетрясений в районе полуострова Камчатка, перед которыми проявлялись гидрогеологические предвестники (а), и наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона (б):

- 1 – самоизливающаяся скважина; 2 – пьезометрическая скважина; 3 – действующий вулкан;
- 4–5 – эпицентры землетрясений, перед которыми гидрогеологические предвестники были выявлены:
- 4 – ретроспективно, 5 – в режиме реального времени; 6 – г. Петропавловск-Камчатский;
- 7 – Петропавловск-Камчатский полигон

Fig. 1. Location diagrams of epicenters of earthquakes on the Kamchatka Peninsula preceded by hydrogeological precursor manifestations (a) and observation wells on the Petropavlovsk-Kamchatsky test site (b):

- 1 – flowing well; 2 – pressure observation well; 3 – active volcano;
- 4–5 – epicenters of the earthquakes, before which hydrogeological precursors were identified: 4 – retrospectively, 5 – in real time mode;
- 6 – the city of Petropavlovsk-Kamchatsky; 7 – the Petropavlovsk-Kamchatsky test site



Материалы и методы исследования

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) много лет проводит наблюдения на сети скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона (см. рис. 1) с целью поиска ГП в изменениях параметров подземных вод: уровня / давления, температуры и химического состава воды и газа [12, 13]. Наблюдательные скважины (см. рис. 1, *b*) вскрывают напорные подземные воды в скальных водовмещающих породах на глубинах от первых сотен метров до 2,5 км. В работах [1–3, 12–15] приводятся данные о скважинах, технических средствах измерения параметров подземных вод, дается описание методов обработки данных наблюдений, рассматриваются выявленные гидрогеодинамические и гидрогеохимические эффекты перед землетрясениями и активизациями ближайших вулканов, анализируются примеры успешного использования ГП при прогнозировании землетрясений. В работах [14–16] рассматриваются сигналы в изменении давления воды в скважине Е-1 при активизациях вулканов Корякского и Авача.

Уникальной особенностью многолетнего эксперимента по регистрации параметров подземных вод в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона является то, что эти данные используются для составления регулярных еженедельных сообщений о наличии / отсутствии ГП. По данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 (см. рис. 1, *b*) прогностические заключения составляются в Лаборатории геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН под руководством Г.Н. Копыловой с 2002 г. По данным гидрогеохимических наблюдений на скважинах ГК-1, М-1 и Г-1 заключения составляются в Лаборатории гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН [1, 3]. Сейсмопрогностические заключения передаются в экспертные советы по прогнозу землетрясений, действующие в Камчатском крае. Одной из функций таких советов, в частности Камчатского филиала

Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), является оценка поданных прогнозов на предмет их соответствия с произошедшими землетрясениями [1–3].

Результаты исследования

Связь гидрогеологических предвестников с параметрами землетрясений. Рассмотрим зависимость между проявлениями ГП в нескольких ($n \geq 2$) скважинах от параметров последующих землетрясений – величин их магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e , км – с учетом параметров воздействия землетрясений в районе наблюдений (рис. 2). В качестве параметров воздействия ожидаемого землетрясения после проявления ГП использовалась расчетная величина удельной плотности сейсмической энергии e , Дж/м³, [3, 17–19] и интенсивность сотрясений по 12-бальной шкале MSK-64 I_{MSK-64} ¹ в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Всего за время наблюдений произошло семь землетрясений (таблица), перед которыми ГП проявлялись в двух-четырех скважинах. Все такие землетрясения относились к наиболее сильным сейсмическим событиям с магнитудами $M_w = 6,6–7,8$ и происходили на эпицентральных расстояниях $d_e = 90–300$ км от скважин. На территории Петропавловск-Камчатского полигона такие землетрясения сопровождались сотрясениями с интенсивностью $I_{MSK-64} = 4–6$ баллов. В районах скважин величины сейсмической энергии e при таких землетрясениях составляли от 0,1 до 4,5 Дж/м³. Было обнаружено, что ГП проявляются в нескольких скважинах исключительно в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений [3, 21], для которых величина отношения эпицентрального расстояния землетрясений d_e к максимальному линейному размеру очага землетрясения L составляет от 1 до 3,7 (см. таблицу).

Время и заблаговременность проявления ГП перед землетрясениями в отдельных скважинах составляли от одного до девяти месяцев (см. таблицу). Это показывает, что оперативная диагностика ГП дает возможность их

¹ Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965. 11 с.

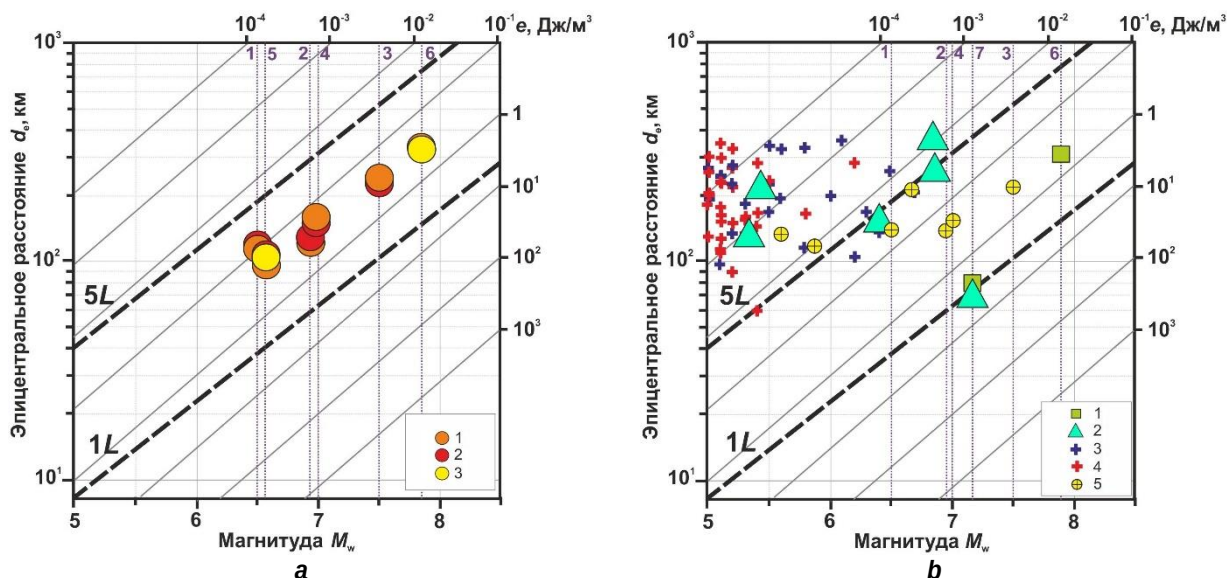


Рис. 2. Распределение гидрогеологических предвестников в наблюдательных скважинах в зависимости от магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e последующих землетрясений, а также удельной плотности сейсмической энергии e :

а – гидрогеологические предвестники в химическом составе воды в самоизливающихся скважинах: 1 – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; *б* – гидрогеологические предвестники в изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах: 1 – ЮЗ-5; 2–5 – Е-1: 2 – гидрогеологические предвестники выделены в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, 3 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ км выделены ретроспективно, 4 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ км не проявлялись, 5 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями 1987–1996 гг. выделены ретроспективно [5]

Тонкими вертикальными пунктирными линиями показаны землетрясения 1–7 (таблица), которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в двух-четырех скважинах. Линии 1L, 5L показывают один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения в зависимости от величины магнитуды [20]

Fig. 2. Distribution of hydrogeological precursors in observation wells depending on the magnitude M_w and epicentral distance d_e of the consequent earthquakes, as well as specific density of the seismic energy e :

a – hydrogeological precursors in the chemical composition of water in flowing wells: 1 – GK-1; 2 – M-1; 3 – G-1; *b* – hydrogeological precursors in water level changes in pressure observation wells: 1 – YuZ-5; 2–5 – E-1: 2 – hydrogeological precursors are identified in real-time and a prognostic conclusion on possible earthquake is given for the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council on Earthquake Prediction, Assessment of Seismic Hazard and Risk, 3 – hydrogeological precursors of the earthquakes with $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ km were identified retrospectively, 4 – hydrogeological precursors of the earthquakes with $M_w \geq 5$, $d_e \leq 350$ km did not manifest themselves, 5 – hydrogeological precursors of 1987–1996 earthquakes were identified retrospectively [5]

Thin vertical dashed lines show earthquakes 1–7 (see the table), which were preceded by the manifestations of hydrogeological precursors in two-four wells. Lines 1L and 5L show one and five maximum linear sizes of the earthquake source depending on the magnitude [20]

использования в комплексе с другими сейсмо-прогностическими данными для осуществления средне-краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. Результаты анализа ГП в пяти скважинах Петропавловск-Камчатского полигона (см. рис. 1, *b*) также показывают, что все они являются информативными для обнаружения ГП перед сильными землетрясениями при условии обеспечения их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями.

Повышенная чувствительность скважины Е-1 к процессам подготовки землетрясений и вулканических активизаций. Скважина Е-1 расположена в 12 и 25 км от действующих вулканов Корякского и Авача (см. рис. 1, *b*). Она характеризуется повышенной чувствительностью к процессам подготовки землетрясений на расстояниях до 350 км. В ней ГП проявляется как перед сильными ($M_w \geq 6,6$), так и перед средними по силе землетрясениями ($M_w = 5–6,5$) [3, 5, 16]. При этом степень



Землетрясения, которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в двух-четырёх наблюдательных скважинах, полуостров Камчатка (номера землетрясений соответствуют номерам на рис. 2)^{2,3}

Earthquakes preceded by the manifestations of hydrogeological precursors in two-four observation wells, the Kamchatka Peninsula (earthquake numbers correspond to the numbers in Fig. 2)^{2,3}

Землетрясение	Дата, координаты эпицентра	H , км	M_w	L , км	d_e , км	d_e/L	e , Дж/м ³	I_{MSK-64} , баллы	Скважина; продолжительность / заблаговременность проявления гидрогеологических предвестников*, недели
1	06.10.1987, 52.86°N 160.23°E	33	6,5	37	130–134	3,5–3,7	0,1	5	ГК-1 – 30/30, М-1 – 4/4, Е-1* – 5/5
2	02.03.1992, 52.76°N 160.20°E	20	6,9	56	133–136	2,4	0,2	5–6	ГК-1 – 39/39, М-1 – 4/4, Е-1 – 9,5/9,5
3	08.06.1993, 51.20°N 157.80°E	40	7,5	103	220–233	2,1–2,3	0,3	5	ГК-1 – 4/4, М-1 – 4/21,5, Е-1 – 36/36
4	13.11.1993, 51.79°N 158.83°E	40	7	62	157–167	2,5–2,7	0,1–0,2	5–6	ГК-1 – 4/4, М-1 – 4/17, Е-1 – 12/12
5	01.01.1996, 53.88°N 159.44°E	0	6,6	41	95–108	2,3–2,6	0,1–0,2	4–5	ГК-1 – 30/30, М-1 – 4/13, Г-1 – 21,5/21,5
6	05.12.1997, 54.64°N 162.55°E	10	7,8	139	305–314	2,2–2,3	0,3–0,4	5–6	ГК-1 – 21,5/21,5, Г-1 – 13/13, Е-1 – 3/3, Ю3-5 – 3/3
7	30.01.2016, 53.86°N 158.73°E	168	7,2	76	70–80	0,9–1,1	2,7–4,1	4	Е-1 – 3/3, Ю3-5 – 15/15

Примечание. H – глубина очага землетрясения; M_w – магнитуда землетрясения; L – максимальный линейный размер очага землетрясения по [20]; d_e – эпицентральное расстояние до скважин; e – удельная плотность энергии сейсмических волн; I_{MSK-64} – интенсивность сотрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского по 12-бальной шкале макросейсмической интенсивности⁴. * Продолжительность предвестника – продолжительность аномальных изменений гидрогеологических параметров в скважине; заблаговременность предвестника – время от начала аномальных изменений до землетрясения.

Note. H – depth of the earthquake source; M_w – magnitude of the earthquake; L – maximum linear size of the earthquake source according to [20]; d_e – epicentral distance to wells; e – specific density of seismic wave energy; I_{MSK-64} – shaking intensity according to the 12-point scale of macroseismic intensity⁴ in the area of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky.

* Duration of the precursor – duration of anomalous changes of hydrogeological parameters in the well; precursor lead time – time from the onset of anomalous changes to the earthquake.

связи проявлений ГП перед землетрясениями увеличивается с ростом величины магнитуды: ГП проявляются примерно в 50 % случаев перед событиями с $M_w = 5–6,5$ и в 100 % случаев перед землетрясениями с $M_w = 6,6–7,8$ (см. рис. 2, б).

По данным наблюдений в скважине Е-1 в режиме реального времени были выделены ГП с выдачей заблаговременных прогнозов шести землетрясений 2001–2016 гг. с $M_w = 5,3–7,2$ (см. рис. 1, а; 2, б). По заключениям КФ

² Earthquake Hazards // USGS [Электронный ресурс]. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes> (18.02.2021).

³ Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.) // EMSD [Электронный ресурс]. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (18.02.2021).

⁴ Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965. 11 с.



РЭС эти прогнозы были признаны оправдавшимися по времени, местоположению и величине магнитуды ожидаемых сейсмических событий [1, 22, 23].

За время наблюдений на скважине Е-1 с 1987 г. трижды происходили активизации ближних вулканов, в том числе эксплозивно-эффузивное извержение вулкана Авача в январе 1991 г., гидротермально-магматическое извержение Корякского вулкана в декабре 2008 и 2009 г., а также усиление сейсмичности и фумарольной деятельности вулкана Авача в октябре 2019 – марте 2020 г. [14, 15]. В каждом случае перед такими активизациями наблюдалось повышение уровня воды в течение первых лет, показывающее рост давления подземной воды с амплитудами 0,045–0,122 бар. В качестве причины роста давления рассматривались два гипотетических механизма, инициированных движением гидротермально-магматического флюида: за счет квазиупругой деформации объемного сжатия водовмещающих пород [16] и за счет увеличения газовой разгрузки в ствол скважины [24].

Заключение

Таким образом, созданная в КФ ФИЦ ЕГС РАН техническая и информационная инфраструктура автоматизированных наблюдений на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона обеспечивает получение, обработку и оперативный анализ данных с выделением ГП в режиме, близком к реальному времени.

Установленные связи проявлений ГП в нескольких скважинах с параметрами наиболее сильных землетрясений совместно с оценками их воздействия в районах наблюдений, а также результаты использования ГП в практике работы экспертных советов по прогнозу землетрясений составляют научно-технический базис для включения гидрогеологического метода скважинных наблюдений в разработку геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае. Отдельные скважины, расположенные вблизи действующих вулканов, также могут использоваться для мониторинга вулканической активности и прогнозирования извержений.

Список литературы

1. 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.
2. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6,0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 85–95. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010033>
3. Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological earthquake precursors: a case study from the Kamchatka peninsula // *Frontiers in Earth Science*. 2020. Vol. 8. P. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>
4. Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.
5. 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.
6. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
7. 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.
8. 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>
9. Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia) // *Pure and Applied Geophysics*. 2000. Vol. 157. P. 1359–1377. <https://doi.org/10.1007/PL00001123>
10. Biagi P.F., Ermini A., Cozzi E., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997 // *Natural Hazards*. 2000. Vol. 21. P. 263–276. <https://doi.org/10.1023/A:1008178104003>
11. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатского филиала ГС РАН / отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112.
12. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>



13. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки: монография. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.

14. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г. Проявление активизаций вулканов Авачинской группы в изменениях уровня воды в скважине Е-1 // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXIII ежегод. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 99–102.

15. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2020): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 87–90.

16. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.

17. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. <https://doi.org/10.31857/S0002333720030035>

18. Wang C.-Y. Liquefaction beyond the near field // Seismological Research Letters. 2007. Vol. 78. Iss. 5.

P. 512–517. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>

19. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and water. Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. 228 p.

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

21. Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2020. Вып. 48. № 4. С. 5–20. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20>

22. Чебров В.Н., Абубакиров И.Р., Богданов В.В., Болдина С.В., Бусс Ю.Ю., Власов Ю.А. [и др.]. Сильные камчатские землетрясения 2013 года / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.

23. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрозина С.Я., Иванова Е.И., Матвеев Е.А. [и др.]. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15,7$, $M_w = 7,2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2016. Вып. 29. № 1. С. 5–16.

24. Koryukhin A., Voronin P., Zhuravlev N., Kopylova G. Water-methane geothermal reservoirs in a south-west foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Proceedings, 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, 2021. P. 320–325.

References

1. Chebrov VN, Saltykov VA, Serafimova YuK. *Earthquake forecasting in Kamchatka. A case study of the Kamchatka branch of the Russian Expert Council for earthquake forecasting, assessment of seismic hazards and risk in 1998–2009*. Moscow: Svetoch Plyus; 2011. 304 p. (In Russ.)

2. Chebrov VN, Saltykov VA, Serafimova YuK. Identifying the precursors of large ($M \geq 6.0$) earthquakes in Kamchatka based on data from the Kamchatka Branch of the Geophysical Service: 1998–2011. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2013;1:85–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0203030613010033>

3. Kopylova G, Boldina S. Hydrogeological earthquake precursors: a case study from the Kamchatka peninsula. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>

4. Kopylova GN, Sugrobov VM, Khatkevich YuM. Earthquake-induced variations in the regime of springs and hydrogeological wells in the Petropavlovsk test site, Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1994;2:53–70. (In Russ.)

5. Kopylova GN. Variations of water level in Elizovskaya-1 well, Kamchatka due to large earthquakes: 1987–1998 observations. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2001;2:39–52. (In Russ.)

6. Kopylova GN. Earthquake-induced Water Level Changes in the YuZ-5 Well, Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2006;6:52–64. (In Russ.)

7. Kopylova GN, Boldina SV. On the mechanism of a hydrogeodynamic precursor of the Kronotsky earthquake, December 5, 1997, $M_w = 7.8$. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2012. T. 31. № 5. S. 104–114. (In Russ.)

8. Boldina SV, Kopylova GN. 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. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2017;8(4):863–880. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>

9. Biagi PF, Ermini A, Kingsley SP, Khatkevich YM, Gordeev EI. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia). *Pure and Applied Geophysics*. 2000;157:1359–1377. <https://doi.org/10.1007/PL00001123>

10. Biagi PF, Ermini A, Cozzi E, Khatkevich YM, Gordeev EI. Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997. *Natural Hazards*. 2000;21:263–276. <https://doi.org/10.1023/A:1008178104003>

11. Khatkevich YuM, Ryabinin GV. Hydrogeochemical researches on Kamchatka. In: Gordeev EI, Chebrov VN (eds.). *Kompleksnye seismologicheskie i geofizicheskie issledovaniya Kamchatki. K 25-letiyu Kamchatskogo filiala GS RAN = Complex seismological and geophysical researches of Kamchatka. To 25th Anniversary of Kamchatkan Experimental & Methodical Seismological Department*.



Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatskii pechatnyi dvor; 2004. p.96–112. (In Russ.)

12. Kopylova GN, Boldina SV. Hydrogeoseismological research in Kamchatka: 1977–2017. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2019;2:3–20. <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20>

13. Kopylova GN, Boldina SV. *Hydrogeoseismic variations of water-level in Kamchatka wells*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress; 2019. 144 p. (In Russ.)

14. Kopylova GN, Boldina SV, Chubarova EG. Manifestation of the Avacha group volcanoes activation in E-1 well water-level variations. In: *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: materialy XXIII ezhegodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa = Volcanism and related processes: Proceedings of the 23th annual scientific conference devoted to the Volcanologist's Day*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020. p.99–102. (In Russ.)

15. Kopylova GN, Boldina SV. Groundwater pressure changes due to magmatic activation: case study of the E-1 well, Kamchatka peninsula, Russia. In: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefi i gaza (Geothermal Volcanology Workshop 2020): materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology (Geothermal Volcanology Workshop 2020): Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020. p.87–90. (In Russ.)

16. Kopylova GN, Boldina SV. 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. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2012;5:41–54. (In Russ.)

17. Kopylova GN, Boldina SV. Effects of seismic waves in water level variations in a well: empirical data

and models. *Fizika Zemli*. 2020;4:102–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0002333720030035>

18. Wang CY. Liquefaction beyond the near field. *Seismological Research Letters*. 2007;78(5):512–517. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>

19. Wang CY, Manga M. *Earthquakes and water*. Berlin – Heidelberg: Springer; 2010. 228 p.

20. Riznichenko YuV. Dimensions of the source of the crustal earthquake and seismic moment. In: Riznichenko YuV (ed.). *Issledovaniya po fizike zemletryasenii = Studies on the physics of earthquakes*. Moscow: Nauka; 1976. p.9–27. (In Russ.)

21. Kopylova GN, Yusupov ShS, Serafimova YuK, Shin LYu, Boldina SV. Hydrogeochemical earthquake precursors (on the example of areas of the Kamchatka Peninsula, Russia, and the Republic of Uzbekistan). *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2020;48(4):5–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20>

22. Chebrov VN, Abubakirov IR, Bogdanov VV, Boldina SV, Buss YuYu, Vlasov YuA, et al. *Large Kamchatka earthquakes in 2013*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Novaya kniga; 2014. 252 p. (In Russ.)

23. Chebrov VN, Kugayenko YuA, Abubakirov IR, Droznina SYa, Ivanova EI, Matveenko EA, et al. The January 30th, 2016 earthquake with $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ in the Zhupanovsky region (Kamchatka). *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr". Nauki o Zemle = Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2016;29(1):5–16. (In Russ.)

24. Koryukhin A, Voronin P, Zhuravlev N, Kopylova G. Water-methane geothermal reservoirs in a south-west foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka. *Proceedings, 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*. Stanford; 2021. p.320–325.

Сведения об авторах / Information about the authors



Копылова Галина Николаевна,

доктор геолого-минералогических наук, доцент,
главный научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований,
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской Академии наук»,
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия,

✉ e-mail: gala@emsd.ru

SPIN: 6586-6121,

WoS: AAO-3267-2020,

Scopus: 36084741800,

ORCID: 0000-0002-0762-2959,

Loop: 866354,

<https://www.researchgate.net/profile/G-Kopylova>

Galina N. Kopylova,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Chief Researcher of the Laboratory of Geophysical Research,
Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia,

✉ e-mail: gala@emsd.ru



SPIN: 6586-6121,
WoS: AAO-3267-2020,
Scopus: 36084741800,
ORCID: 0000-0002-0762-2959,
Loop: 866354,
<https://www.researchgate.net/profile/G-Kopylova>



Болдина Светлана Васильевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории геофизических исследований,
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской Академии наук»,
683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, 9, Россия,
e-mail: boldina@emsd.ru
SPIN: 7286-8399,
WoS: G-2558-2017,
Scopus: 22953141000,
ORCID: 0000-0001-7234-0053,
Loop: 866367,
<https://www.researchgate.net/profile/Sv-Boldina>
Svetlana V. Boldina,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Laboratory of Geophysical Research,
Kamchatka Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia,
e-mail: boldina@emsd.ru
SPIN: 7286-8399,
WoS: G-2558-2017,
Scopus: 22953141000,
ORCID: 0000-0001-7234-0053,
Loop: 866367,
<https://www.researchgate.net/profile/Sv-Boldina>

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 09.04.2021; принята к публикации 13.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 09.04.2021; accepted for publication 13.05.2021.