

УДК 556.3+550.34

DOI: 10.35540/903258-451.2021.8.48

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ: ОБЗОР МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

*Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук»,
г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru*

Введение

Аномальные изменения физико-химических параметров подземных вод перед землетрясениями, называются гидрогеологическими предвестниками (далее ГП). ГП обусловлены процессами подготовки землетрясений и могут использоваться для решения задач сейсмического прогнозирования, в первую очередь, для оценки времени сильных землетрясений [1, 21].

Для изучения ГП проводятся наблюдения на скважинах и источниках за вариациями давления, разгрузки, температуры и химического состава подземной воды и газов. На полуострове Камчатка такие наблюдения были начаты в 1977 г. с периодичностью наблюдений на сети скважин и источников один раз в 3–6 сут. С 1996 г. используются автоматизированные средства регистрации уровня/давления, температуры и электропроводности воды в пьезометрических скважинах Е-1, ЮЗ-5 и в самоизливающейся скважине М-1 [4].

Основной целью изучения ГП является получение достоверных данных о пространственно-временных проявлениях аномалий физико-химических параметров подземных вод перед землетрясениями для разработки методов сейсмического прогноза и создания научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае [7]. Данные о ГП также позволяют изучать процессы подготовки землетрясений и сопутствующие им явления в водонасыщенной геологической среде сейсмоактивных регионов [22].

Уникальной особенностью многолетнего эксперимента по регистрации параметров подземных вод в скважинах Камчатки является то, что эти данные используются для составления регулярных сообщений о наличии/отсутствии ГП. По данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 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 [4, 7, 12, 13, 21]. 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 [12, 13].

В последние годы авторами было выполнено обобщение материалов по проявлениям ГП в изменениях уровня/давления и химического состава подземных вод по данным многолетних наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН (1977 г. – наст. время) в пяти глубоких скважинах с естественным режимом самоизлива и формирования напора [4–8, 21, 22]. Основу исследования составили данные наблюдений на скважинах, функционирующих в условиях естественного режима самоизлива и формирования напора, а также материалы ранее опубликованных работ авторов и других исследователей [11, 17, 18]. Все используемые данные находятся в базах данных в составе информационных ресурсов ФИЦ ЕГС РАН.

Выполненное обобщение позволяет рассматривать современное состояние гидрогеологического метода как потенциального элемента научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

Связь ГП с параметрами землетрясений

В работе рассматривались землетрясения (всего 7 событий) и предшествующие им ГП в изменениях уровня и химического состава воды, которые проявлялись не менее чем в двух наблюдательных скважинах (рис. 1). Было обнаружено, что ГП проявлялись в 2–4 скважинах в течение 1–9 мес. перед наиболее сильными землетрясениями с $M_w = 6.6–7.8$, которые произошли на эпицентральных расстояниях до скважин 70–320 км. Скважины, в которых проявлялись ГП,

находились в ближней и промежуточной зонах очагов землетрясений, для которых соотношение эпицентрального расстояний и максимального размера очага [10] составляло от 1 до 3.7. В г. Петропавловске-Камчатском такие землетрясения сопровождались сотрясениями с интенсивностью $I_{MSK-64} = 4-6$ баллов¹. В районах скважин расчетные величины удельной плотности сейсмической энергии e [16, 21] при таких землетрясениях составляли от 0.1 до 4.5 Дж/м³.

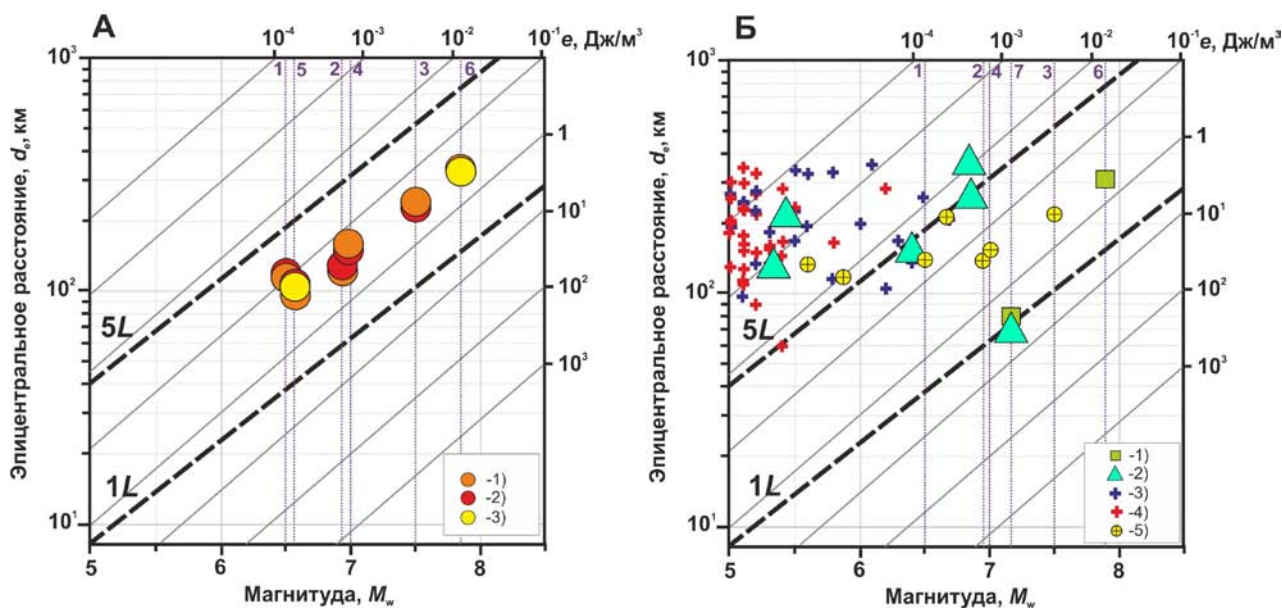


Рис. 1. Распределение гидрогеологических предвестников в наблюдательных скважинах в зависимости от магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e последующих землетрясений (показаны вертикальными линиями, номера соответствуют землетрясениям: 1 – 06.10.1987 г., $M_w = 6.6$; 2 – 02.03.1992 г., $M_w = 6.9$; 3 – 08.06.1993 г., $M_w = 7.5$; 4 – 13.11.1993 г., $M_w = 7.0$; 5 – 01.01.1996 г., $M_w = 6.9$; 6 – 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$; 7 – 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$ (эпицентральные расстояния $d_e = 90 - 300$ км), а также удельной плотности сейсмической энергии e [16, 21]: **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 КФ РЭС, 3 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км, выделенные ретроспективно, 4 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км не проявились, 5 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями 1987–1996 г., выделенные ретроспективно [2]. Тонкими вертикальными пунктирными линиями показаны землетрясения, которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в двух-четырёх скважинах. Линии 1L, 5L показывают один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения в зависимости от величины магнитуды [10].

Время и заблаговременность проявления ГП перед землетрясениями в отдельных скважинах составляли от 1 до 9 месяцев. Таким образом, оперативная диагностика ГП дает возможность их использования, в комплексе с другими сейсмопрогностическими данными, для осуществления средне-краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений.

Результаты анализа ГП в пяти наблюдательных скважинах Петропавловск-Камчатского полигона также показали, что все скважины являются информативными для обнаружения ГП перед сильными землетрясениями при условии обеспечения их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями.

О повышенной чувствительности 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 вблизи области расположения их магматических очагов [19]. Для нее характерна повышенная чувствительность к процессам подготовки землетрясений на расстояниях до 350 км. В скв. Е-1 ГП

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

проявлялись как перед сильными ($M_w \geq 6.6$), так и перед средними по силе землетрясениями ($M_w = 5-6.5$) [2–5, 21]. При этом степень 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. 1, 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 $M_w = 5.3-7.2$ (рис. 1, Б). По заключениям КФ РЭС эти прогнозы были признаны оправдавшимися по времени, местоположению и величине магнитуды ожидаемых сейсмических событий [12–15].

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. [2, 3, 5–7, 9, 20]. 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 (таблица 1).

В качестве причины роста давления рассматривались два гипотетических механизма, инициированных движением гидротермально-магматического флюида: за счет квазиупругой деформации объемного сжатия водовмещающих пород [3] и за счет увеличения газовой разгрузки в ствол скважины [20].

Таблица 1. Параметры трендов повышения давления подземной воды в скважине Е-1 в связи с извержениями и активизациями вулканов Авачинской группы

Время развития тренда повышения уровня; годы, месяцы (сутки)	Амплитуда повышения уровня, м / средняя скорость повышения, см/сут	Амплитуда роста давления подземной воды, бар	Объемная деформация сжатия водовмещающих пород $\Delta \varepsilon, 10^{-6}$ / скорость, сут^{-1}
Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Авачинский 12–26 января 1991 г.			
янв. 1987 – янв. 1991 гг., 3 года 1 мес. (≥ 1125 сут)	$\geq 0.45 / 0.04$	≥ 0.045	$\geq 3.0 / 2.7 \cdot 10^{-9}$
Гидротермально-магматическое извержение влк. Корякский в декабре 2008-2009 гг.			
июнь 2006 – дек. 2009 гг., 3 года 6 мес. (1260 сут)	1.22 / 0.10	0.122	8.1 / $6.4 \cdot 10^{-9}$
Повышение уровня воды с 15 июня 2018 г. – по 14 июля 2021 г.: активизация влк. Авача в октябре 2019 – марте 2020 гг. (?)			
Июнь 2018 – июль 2021 гг. 3 года 1 мес. (1126 сут)	0.83 / 0.07	0.083	5.5 / $4.9 \cdot 10^{-9}$

Заключение

Созданная в КФ ФИЦ ЕГС РАН техническая и информационная инфраструктура 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.

Скважина Е-1, расположенная вблизи действующих вулканов Авачинской группы, также может использоваться для мониторинга вулканической активности и прогнозирования вулканических извержений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (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».

Список литературы

1. 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.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
3. Копылова Г.Н., 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.
4. 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>.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки: монография. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.
6. 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.
7. 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>.
8. 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.
9. 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 ежегодной науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 99–102.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дроздина 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.
16. Wang C.-Y. Liquefaction beyond the near field // Seismological Research Letters. 2007. V. 78. Iss. 5. P. 512–517.
17. 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. V. 157. P. 1359–1377.
18. 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. V. 21. P. 263–276.
19. Bushenkova, N., Koulakov, I., Senyukov, S., Gordeev, E. I., Huang, H. H., El Khrepy, S., & Al Arifi, N. Tomographic images of magmachambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. 124. 9694–9713.
20. Kiryukhin 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.
21. Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological earthquake precursors: a case study from the Kamchatka peninsula // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. P. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>.
22. Kopylova, G.; Boldina, S. Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021. 11. 731. <https://doi.org/10.3390/min11070731>.