

## ВИБРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗМЕНЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ПО ДАННЫМ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ)

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, boldina@emsd.ru

### Введение

Многообразие откликов давления подземных вод при похождении сейсмических волн является широко обсуждаемым вопросом при проведении наблюдений в скважинах [1, 6, 8, 10, 11, 12]. Даже при одном и том же землетрясении в близко расположенных скважинах могут проявляться различные эффекты вибрационного воздействия в изменениях давления подземных вод – колебания (осцилляции), понижения и повышения различной продолжительности. Познавательный интерес представляет объяснение такого многообразия на основе соответствующих моделей гидрогеодинамических процессов в системе скважина-водовмещающая порода.

В работе [6] на примере данных многолетней регистрации уровня воды в скважине ЮЗ-5 с периодичностью 5 мин. были выделены четыре типа откликов давления подземной воды при землетрясениях в диапазоне магнитуд  $M_w = 6.8 - 9.1$  и эпицентральных расстояний  $d_e = 80 - 14600$  км и рассмотрены модели их формирования. С использованием широкополосных записей землетрясений на ближайшей сейсмостанции, продемонстрирована зависимость проявления четырех выделенных типов откликов давления воды от амплитудно-частотного состава сейсмических волн и параметров интенсивности вибрационного воздействия, таких как удельная плотность сейсмической энергии и максимальная скорость сейсмических волн в районе скважины. Таким образом, на примере одной скважины с известными строением, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород было продемонстрировано, что разнообразие откликов давления подземной воды на динамическую деформацию водовмещающих пород определяется инициацией различных гидродинамических процессов в системе скважина-водовмещающая порода, сопровождающихся колебаниями, а также ростом или понижением давления различной продолжительности, в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных фаз сейсмических волн. При этом ведущими факторами, вызывающими разнообразие эффектов вибрационного изменения давления (напора) подземных вод, являются вертикальные смещения ствола скважины, усиление вариаций давления в системе скважина-водовмещающая порода на определенных резонансных частотах сейсмического воздействия [9], а также локальные понижения и повышения давления в водовмещающей породе вследствие неоднородности ее строения и, соответственно, неоднородного изменения поля давления подземных вод вблизи скважины [6, 8, 11].

Индивидуальные особенности отдельных скважин в проявлениях вибрационных эффектов и в целом разнообразие откликов уровня/давления воды в наблюдательных скважинах является отражением совокупности гидродинамических процессов, инициированных воздействием сейсмических волн различного амплитудно-частотного состава, и локализованным распределением импульсов повышения или понижения давления в пространстве неоднородных водовмещающих пород вблизи ствола скважины на расстояниях от первых метров до сотен метров.

Определенный вклад в многообразии откликов давления при воздействии сейсмических волн также вносят упругие свойства подземной воды [11]. В частности, при наличии в воде свободного газа ее сжимаемость резко повышается, и величина коэффициента Скемптона, равного отношению изменений давления воды к общему напряжению в скелете породы, резко уменьшается [4, 6]. В этом случае в изменениях давления подземных вод, например, в скважинах Е-1, полуостров Камчатка и BV, Калифорния, США, вибрационные эффекты проявляются в монотонных повышениях уровня воды в течение суток-десятков суток после наиболее сильных землетрясений с интенсивностью сотрясений не менее 5-6 баллов по шкале MSK-64.

Таким образом, многообразие откликов давления подземных вод в скважинах на прохождение сейсмических волн в общем виде объясняется особенностями локальных условий наблюдательных скважин – различиями их конструкции, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород и неоднородностью их строения. 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. Для решения этой задачи в отношении наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона, в 2017–2021 гг. была выполнена модернизация системы наблюдений с использованием цифровых средств прецизионной регистрации давления подземных вод с частотой от 20 до 0.008 Гц. В работе представлены данные о выполненной модернизации и первые результаты наблюдений вибрационных эффектов в изменениях давления подземных вод, полученных с использованием нового оборудования.

### Модернизация системы наблюдений

Цифровые наблюдения за вариациями уровня воды проводятся КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. В [5, 6, 7] представлены данные о строении скважин Е-1 и ЮЗ-5, свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и зарегистрированных гидрогеодинамических предвестниках, косейсмических скачках и вибрационных эффектах в изменениях уровня воды при местных и телесейсмических землетрясениях при периодичности измерений 5 мин.

В состав оборудования, установленного в 2017–2021 гг. на скважинах ЮЗ-5, Е-1, М-1 и 1303 были включены однотипные погружные высокочувствительные датчики PAA36 XiW CTD Si (давление, температура и электропроводность воды) и PAA36 XW (давление и температура воды) фирмы Keller, Швейцария. В таблице приводится характеристика скважин и установленного оборудования.

Таблица. Данные о наблюдательных скважинах и установленном оборудовании, полуостров Камчатка

Скважина	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м открытий интервал, м	Возраст, состав пород	Дебит $Q$ , дм <sup>3</sup> /с; уровень воды, h, м	Температура воды, °C; минерализация воды, г/дм <sup>3</sup>	Состав воды; состав газа	Состав установленного оборудования (частота регистрации давления подземных вод)
M-1	53.18°/158.28°	600 310–313 407–410 553–556	N, туфы	самоизлив, $Q=1.5$	16; 0.25	SO <sub>4</sub> –Ca–Na; растворенный газ, N <sub>2</sub>	С июля 2020 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si, и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)
E-1	53.26°/158.48°	665 625–645	N, туфы	пьезометрическая, $h=28$	10; 1.5	Cl–HCO <sub>3</sub> – Na; свободный газ, N <sub>2</sub> –CH <sub>4</sub>	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 <sub>2</sub> , алевролиты	пьезометрическая, $h=1.5$	14; 0.45	HCO <sub>3</sub> –SO <sub>4</sub> – Na–Ca; растворенный газ, N <sub>2</sub>	С окт. 2017 по май 2019 г.: датчик PAA36 XW 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 н. вр. датчик PAA36 XiW и регистратор CR1000, (20 Гц).
1303	53.14°/158.36°	717 517–717	N, туфопесчаники	пьезометрическая, $h=25$	14; 0.67	HCO <sub>3</sub> –SO <sub>4</sub> – Na; растворенный газ, N <sub>2</sub>	С апреля 2021 г. датчик PAA- 36XiWSi и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)

На скв. ЮЗ-5 отрабатывался вариант технического и программного совмещения датчиков фирмы Keller, Швейцария с регистраторами фирмы Campbell, США. В сентябре 2017 – мае 2019 гг. проводилась регистрация давления воды на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц; были получены высокочастотные записи вариаций давления при телесейсмических событиях с  $M_w = 7.0 – 8.1$  в районах Аляски и Мексики [2]. В 2018 г. проходил тестирование в полевых условиях комплект аппаратуры производства фирмы Keller, включающий датчик PAA36XiW CTD Si (установлен на глубине 8 м ниже уровня воды) и регистратор GSM-2. С использованием этого оборудования получены непрерывные записи давления с периодичностью 1 мин и были зарегистрированы его вариации при местных землетрясениях с  $M > 4$  и при телесейсмических событиях 30 ноября и 20 декабря 2018 г. [2].

С 2020 г. в скв. ЮЗ-5 проводится на постоянной основе регистрация давления воды на глубине 8 м с частотой 20 Гц с использованием датчика PAA 36XiW и регистратора CR1000. Были получены записи вариаций давления при телесейсмических событиях с  $M_w = 7.1 - 8.2$  в районах Аляски и Японии; при сильных местных событиях 25.03.2020 г.,  $M_w = 7.5$  и 16.03.2021 г.,  $M_w = 6.6$ , а также при камчатских землетрясениях с  $M_w \leq 5.2$ .

На скв. Е-1 в июле 2020 г., дополнительно к отечественному оборудованию для измерений уровня воды Кедр ДМ [7], были установлены датчик PAA36XiW CTD Si (глубина 6 м ниже уровня воды) и регистратор GSM-2. Периодичность измерений давления, температуры и электропроводности воды составляет 2 мин.

В самоизливающейся скв. М-1 с 2013 г. проводятся измерения температуры, электропроводности воды и атмосферного давления с периодичностью 5 мин. с использованием оборудования Кедр ДМ. Дополнительно к нему, в июле 2020 г. установлен комплект аппаратуры в составе датчика PAA 36XiW CTD Si (глубина 5 м) и миникомпьютера Lenovo IdeaCentre Stick 300, Windows 8, в качестве регистратора. На миникомпьютере установлено программное обеспечение к датчику PAA 36XiW CTD Si для измерения давления, температуры и электропроводности воды с периодичностью 1 Гц. Были получены высокочастотные записи параметров подземных вод при телесейсмических событиях с  $M_w = 7.1 - 8.2$  в районах Аляски и Японии и при местном землетрясении 16.03.2021 г. с  $M_w = 6.6$ .

В пьезометрической скв. 1303 с апреля 2021 г. проводятся измерения давления и температуры воды (датчик PAA 36XiW) на глубине 5 м с частотой 1 Гц. В качестве регистратора используется миникомпьютер Ultra-Slim Computer STCK1A8LFC, Windows 8, с установленным программным обеспечением к датчику.

### Результаты наблюдений

На рис. 1 и 2 приводятся данные высокочастотной регистрации давления воды в скв. ЮЗ-5 при двух землетрясениях 2021 г. в сопоставлении с записями этих событий на сейсмостанции PET, соответствующие спектры и их отношения. При построении спектров производился переход к частоте дискретизации 1 с путем усреднения исходных записей с частотой 20 Гц в 20 раз. Спектры строились с использованием метода максимальной энтропии Бурга.

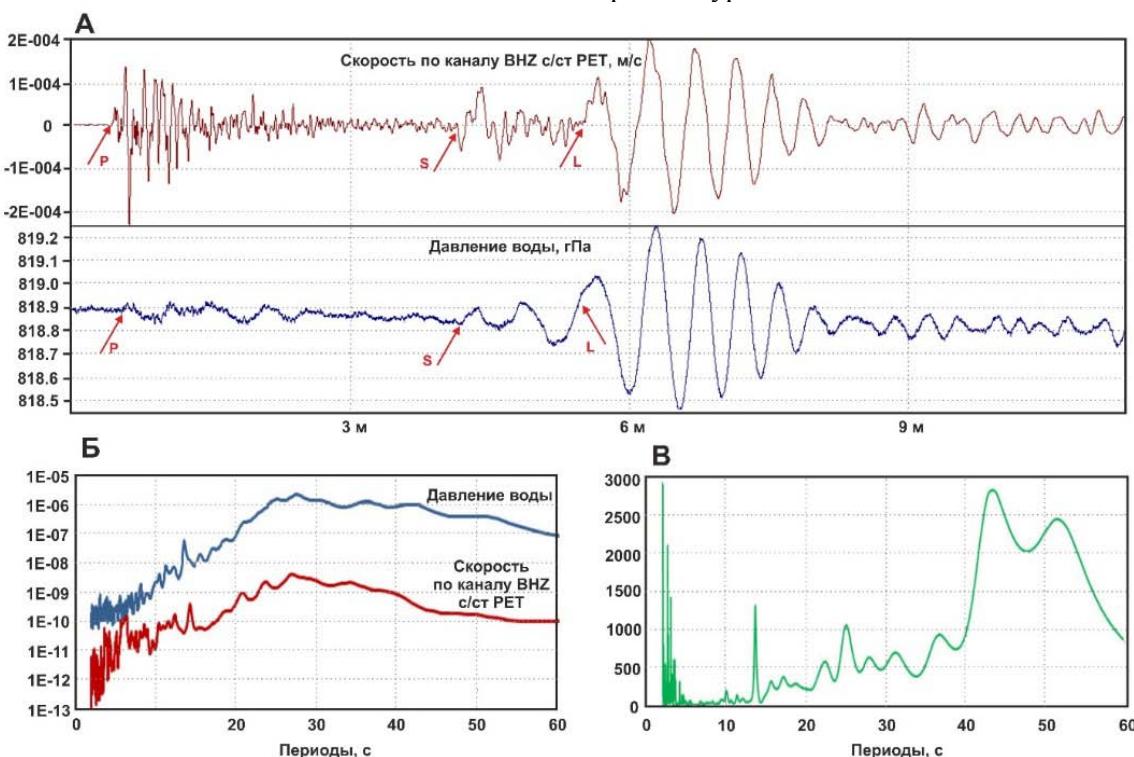


Рис. 1. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 13 февраля 2021 г.,  $M_w = 7.1$ , эпицентральное расстояние  $d_e = 2150$  км в сопоставлении с записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц) (А); спектры мощности вариаций давления и сейсмического сигнала (Б) и их отношение (В). На графике отношения спектров (В) максимальное усиление вариаций давления соответствует периодам 40-50 с, что согласуется с оценкой резонансной частоты скважины ЮЗ-5 в 44 с [3].

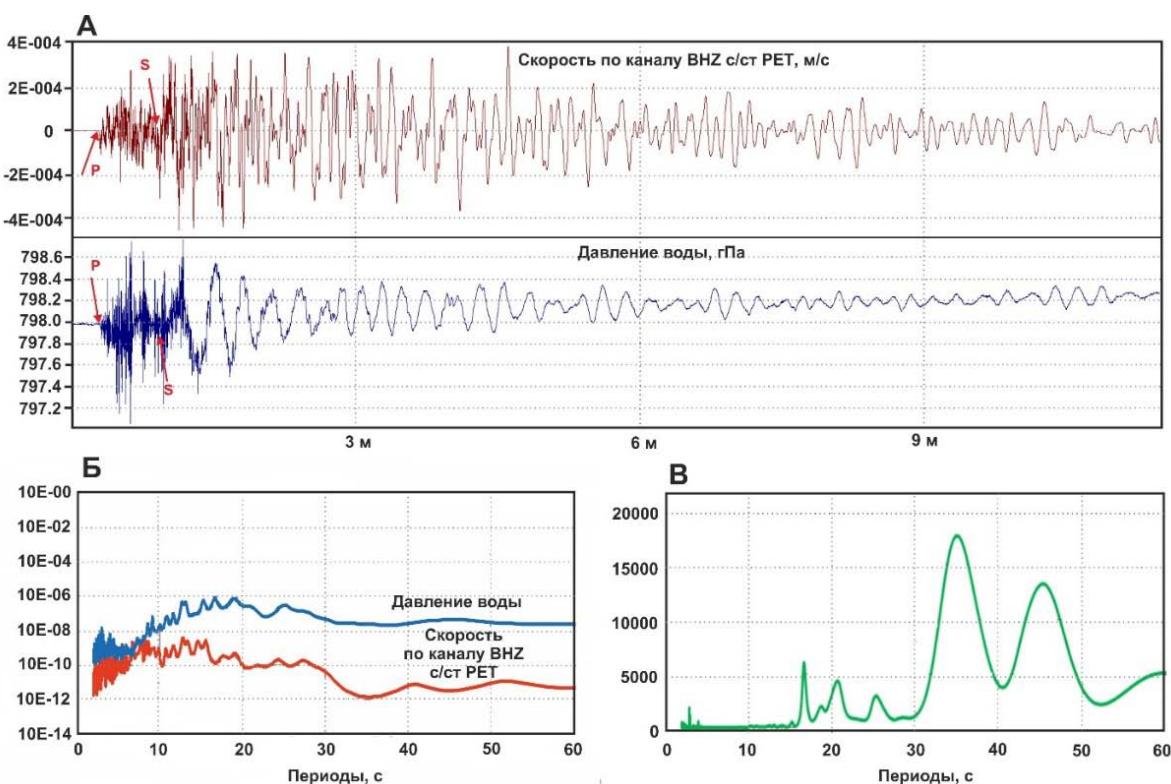


Рис. 2. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 16 марта 2021 г.,  $M_w = 6.6$ ,  $d_e = 350$  км в сопоставлении с записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц) (А); спектры мощности вариаций давления и сейсмического сигнала (Б) и их отношение (В). На графике отношения спектров (В) видно, что усиления вариаций давления воды также приходится на период резонансной частоты скважины 44 с со смещением в область меньших периодов (30-40 с), по сравнению с удаленным землетрясением в Японии (рис. 1Б).

Вступление сейсмических волн Р и S в записях давления воды хорошо выделяются и соответствуют временам вступления на с/ст. PET (рис. 1А, 2А). В случае удаленного землетрясения 13.02.2021 г., в изменениях давления проявились поверхностные волны на периодах более 20 с, идентичные сейсмической записи. В спектрах мощности (рис. 1Б, 2Б) максимальные амплитуды вариаций давления приходятся на периоды в первые десятки секунд, на которых наблюдается эффект усиления вариаций давления по отношению к вертикальным смещениям поверхности земли при максимуме на резонансной частоте скважины 44 с [3].

Наблюданное 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 различных землетрясениях.

### Заключение

Выполненная в 2017–2021 гг. модернизация системы наблюдений на четырех скважинах Петропавловского полигона с использованием прецизионного 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, что 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 связаны с накоплением достоверных данных о высокочастотных откликах давления подземных вод в наблюдательных скважинах сети при вибрационном воздействии сейсмических волн от землетрясений в широких диапазонах магнитуд и эпицентральных расстояний, представляющих природные зондирующие сигналы состояния

наблюдательных систем скважина-водовмещающая порода с потенциальной возможностью оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и мониторинга их изменчивости во времени.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и 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».

### Список литературы

1. 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 // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 1. С. 52–56.
2. Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г. Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017–2018 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Седьмой научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–7 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27–31.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г.,  $M=9.3$  // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39–48.
4. 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.
5. 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>.
6. 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>.
7. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52. С. 43–56. <https://doi.org/10.21455/si2016.4-4>.
8. Brodsky et al., Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.A. A Mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108. P. 2390–2400. <https://doi.org/10.1029/2002JB002321>.
9. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915–3926.
10. Kopylova G. and Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>.
11. Roeloffs, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // JGR. 1998. V. 103. N0.B1. P. 869–889.
12. Wang, Manga, Wang Ch.-Y., Manga M. Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences. Cham: Springer, Switzerland, 2021. 387 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9>.