УДК 550.348.013.4:556.34(571.66)

Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в подземных водах (по данным прецизионных наблюдений в скважинах Камчатки)

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия
gala@emsd.ru

По данным прецизионной регистрации давления подземной воды в скважинах, расположенных в ближней зоне очага Камчатского мега-землетрясения 2025 г., Mw = 8.8, рассматриваются гидрогеодинамические эффекты воздействия сейсмических волн, ко-сейсмическое изменение давления и его постсейсмическое восстановление. Полученные данные используются для развития типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов в скважинах сейсмоактивных регионов.

Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwaters (Based on Precision Observations in Kamchatka Wells)

Galina N. Kopylova, Svetlana V. Boldina

Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia

According to precision measurements of groundwater pressure in wells located in the near zone of the 2025 Kamchatka mega-earthquake's source, the hydrogeodynamic effects of seismic waves, coseismic pressure changes and postseismic recovery are considered. The obtained data are used for the development of a typification of seismohydrogeodynamic effects in wells in seismically active regions.

Разработка типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов (СГГЭ) в скважинах является важной задачей в изучении влияния землетрясений на режим подземных вод сейсмоактивных регионов. При создании такой типизации учитываются механизмы воздействия землетрясений на состояние системы скважина – водовмещающая порода, а также продолжительность и морфологические особенности изменений уровня/давления воды. Зарегистрированные в пьезометрических скважинах СГГЭ обычно разделяются на: 1 – кратковременные косейсмические эффекты, обусловленные динамическим воздействием сейсмических волн и изменением статического напряженного состояния водоносных горизонтов при образовании разрыва в очаге землетрясения; 2 – долговременные постсейсмические изменения давления вследствие комплексного воздействия землетрясения на состояние контролируемого водоносного горизонта за счет изменения проницаемости водовмещающих пород и гидродинамической связности с сопряженными водоносными структурами [1]. Также имеются сообщения о гидрогеодинамических аномалиях перед землетрясениями или гидрогеодинамических предвестниках с описаниями гипотетических механизмов их образования, в т. ч. на примере скважин Камчатки [2, 3]. Вместе с тем, бесспорные доказательства использования гидрогеодинамических предвестников для прогнозирования сильных землетрясений пока отсутствуют.

В основу разрабатываемой типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов положена техническая обоснованность выделения их генетических и морфологических типов с учетом средств регистрации вариаций давления воды в скважинах и методов обработки и визуализации исходных данных. При таком подходе, более обоснованным является разделение СГГЭ на высокочастотные эффекты, регистрируемые при наблюдениях с частотой ≥1 Гц, и на длиннопериодные вариации, проявляющиеся в среднечасовых – среднесуточных изменениях давления с компенсированным воздействием переменной барометрической нагрузки и других факторов, влияющих на изменения давления в водоносном горизонте.

В период Камчатского мега-землетрясения 29 июля 2025 г., $M_w = 8.8$ (МЗ) [4], его сильных ($M_w \geq 6$–7) фор- и афтершоков были зарегистрированы СГГЭ по данным прецизионных наблюдений (1 – 20 Гц, точность ±0.1 гПа) в скважинах на территории Петропавловск-Камчатского полигона, Восточная Камчатка.

Наблюдательная сеть

Скважины вскрывают на глубинах 310–800 м напорные пресные холодные подземные воды в породах неогенового и мелового возраста с трещинной проницаемостью. Описание системы наблюдений приводится в [5]. Продолжительность наблюдений за вариациями уровня/давления воды в отдельных скважинах составляет 5–38 лет.

По данным 1996–2024 гг., в трех пьезометрических скважинах были зарегистрированы СГГЭ в диапазоне периодов от минут до суток и десятков-сотен суток при местных землетрясениях с $M_w = 5.0$–7.8 на расстояниях 70–800 км. Колебания уровня воды при сильнейших, $M_w = 7.6$–9.1 телесейсмических землетрясениях проявлялись на расстояниях до 14.5 тыс. км. Многообразие проявлений СГГЭ определяется строением скважин, локальными гидрогеологическими условиями, в частности, наличием повышенных концентраций газа в составе подземной воды, а также различной интенсивностью сейсмического воздействия в зависимости от величины магнитуды, удаленности и пространственного расположения скважин по отношению к очагам землетрясений [6].

Построение диаграмм зависимости выделенных типов СГГЭ от параметров землетрясений для каждой наблюдательной скважины является эффективным способом представления особенностей их реагирования на сейсмические воздействия. Диаграммы типизации СГГЭ, зарегистрированных в четырех скважинах Камчатки по данным на конец 2024 г., представлены в [7].

Сейсмичность в 2025 г.

Камчатское МЗ, его форшок с $M_w = 7.4$, два афтершока в сентябре с $M_w = 7.4$ и 7.8; другие сильные события активной фазы афтершокового процесса в июле – ноябре 2025 г. (всего 15 событий), сопровождались косейсмическими эффектами в пьезометрических скважинах. Для характеристики интенсивности воздействия отдельных землетрясений в районе скважин используется величина соотношения между гипоцентральным расстоянием d_h и максимальным линейным размером очага землетрясения L [8]. Величина d_h/L показывает относительную удаленность скважины от гипоцентра в размерах очага землетрясения. Для четырех землетрясений с $M_w = 7.4$–8.8 величины $d_h/L = 0.5$–2.3, т. е. при таких землетрясениях скважины находились в ближних зонах их очагов. Для других рассматриваемых землетрясений с $M_w = 5.7$–7.0 величины d_h/L составляли 2.7–9.3, что соответствует расположению скважин в промежуточных (средних) зонах их очагов.

Сейсмогидрогеодинамические эффекты в ближней зоне очагов землетрясений

Новый тип косейсмического эффекта в изменениях давления воды был обнаружен при расположении наблюдательных скважин в ближней зоне очагов сильнейших субдукционных землетрясений. В скважинах ЮЗ-5 (рис. 1) и 1303 при четырех сильнейших землетрясениях происходили понижения давления с амплитудами в десятки – сотни гПа в течение 0.5–1.3 ч. На рис. 1 показаны вариации давления во время прохождения сейсмических волн от МЗ (3.5–5 минут) на фоне *аномального* косейсмического понижения с амплитудой 442 гПа в течение 1 ч 20 мин. При этом величина объемной деформации водовмещающих пород по [6] составила 2.8×10^{-6}. По модели дислокационного источника с параметрами механизма очага МЗ характер деформации в районе скважин соответствовал объемному расширению водовмещающих пород с амплитудой $\approx2\times10^{-6}$ и согласовался с данными спутниковой геодезии и интерферометрии, а также с изменениями гидрогеологических параметров в скважинах Паратунского, Пиначевского, Кеткинского и Вилючинского термальных полей (падение давления, уменьшение разгрузки вплоть до прекращения самоизлива) [9].

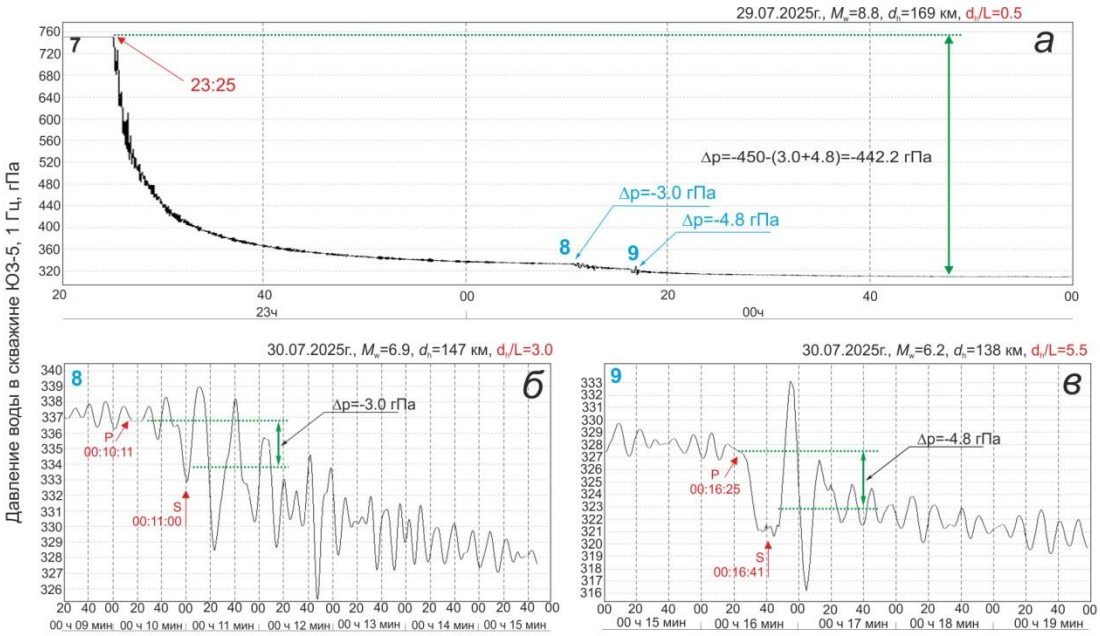


Рисунок 1 – Изменения давления воды в скв. ЮЗ-5 при МЗ, включающие косейсмическое понижение с амплитудой 442 гПа в течение 1 ч 20 мин (а) и при афтершоках 8 и 9 с амплитудами 3 гПа (б) и 4.8 гПа (в), оцененными по данным в интервале между вступлениями P и S-волн

В течение косейсмического понижения давления при МЗ произошли афтершоки (указаны цифрами 8 и 9 на рис. 1*а*), которые сопровождались понижениями давления с амплитудами 3.0 и 4.8 гПа (рис. 1*б, в*). В случаях этих афтершоков, а также других землетрясений с $M_w < 7.4$, косейсмические амплитуды оценивались по разности между средними значениями давления при прохождении P и S-волн.

На рис. 2 демонстрируются осцилляции давления при динамическом воздействии объемных P и S-волн и поверхностных волн Рэлея L_R. Высокочастотные колебания давления при прохождении объемных волн были обусловлены вертикальными движениями ствола скважины, его «тряской» (рис. 2*в*). Вступление поверхностных волн Релея сопровождалось усилением вариаций давления в скважине с проявлением гармонических компонент с периодами ≈20–30 с в записи давления воды (рис. 2*г*).

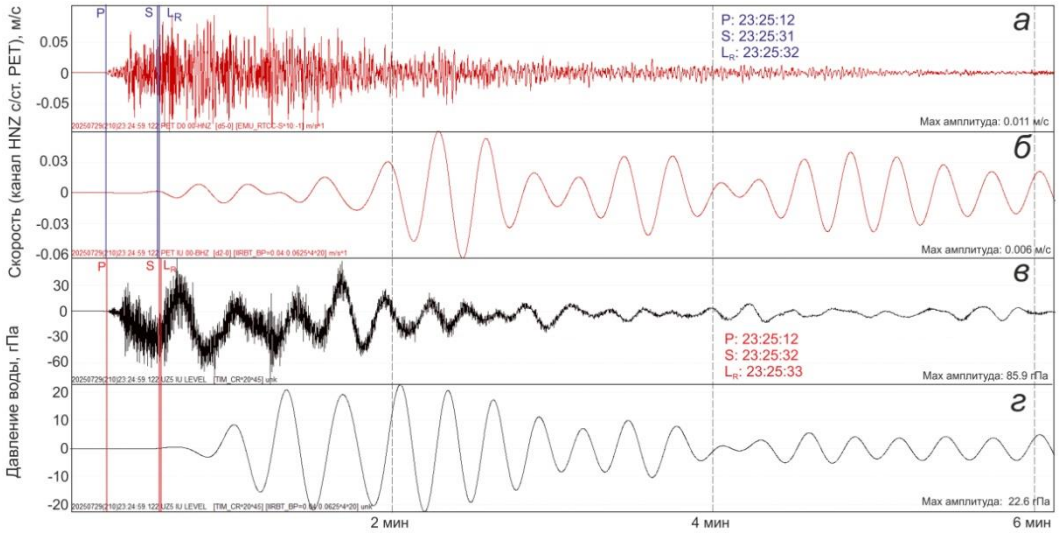


Рисунок 2 – Сейсмическая запись МЗ на сейсмостанции «Петропавловск» (а), гидросейсмограмма вариаций давления воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне частот ≥0.022 Гц (периоды вариаций ≤45 с) (в) и выделенные низкочастотные составляющие (0.06 – 0.04 Гц, периоды 16 – 23 с) в сейсмической записи (б) и в вариациях давления воды (г)

Восстановление (повышение) давления в скв. ЮЗ-5 после МЗ и его сильнейших афтершоков продолжается до настоящего времени (июль 2026 г.) и относится к длиннопериодным СГГЭ. В скв. 1303 восстановление давления закончилось в октябре 2025 г.

Результаты.

Выделен новый тип СГГЭ в пьезометрических скважинах, расположенных в ближней зоне очагов субдукционных землетрясений взбросового типа с M_w = 7.4–8.8 и d_h/L = 0.5–2.3, который характеризуется наложением высокочастотных вариаций давления при прохождении сейсмических волн на значительное (до сотен гПа) косейсмическое понижение давления подземной воды в течение десятков минут – 1.3 ч с последующим длительным восстановлением в течение месяцев.

Амплитуды косейсмического понижения давления в скв. ЮЗ-5 при 15-ти землетрясениях в июле-ноябре 2025 г. с M_w = 5.7–8.8 составляли 0.2–442 гПа. Величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород по данным скважинных наблюдений составляют ед.$\times 10^{-9}$ – ед.$\times 10^{-6}$ и согласуются в пределах одного порядка с величинами, полученными по модели дислокационного источника с параметрами механизмов очагов землетрясений по каталогу GlobalCMT. Это показывает, что зарегистрированные эффекты косейсмического понижения давления воды в наблюдательных скважинах вблизи очагов сильных субдукционных землетрясений могут использоваться для количественной оценки косейсмической деформации.

Работа выполнена по Госзаданию № 075-00609-26 ФИЦ ЕГС РАН с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Wang C.-Y.* Earthquakes and Water / *C.-Y. Wang, M. Manga* // Springer: Berlin, Germany. 2010. 225 P.

2. *Kopylova G.N.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula / *G.N. Kopylova, S.V. Boldina* // Frontiers Earth Sciences. 2020. V. 8. P. 576017. DOI: 10.3389/feart.2020.576017.

3. *Кирюхин А.В.* О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре / *А.В. Кирюхин, В.А. Корнеев, А.Ю. Поляков* // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.

4. *Чебров Д.В.* Камчатское мега-землетрясение 29 июля 2025 г. (Mw=8.8) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2025. № 3. Вып. № 67. С. 113–117.

5. *Болдина С.В.* 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* // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 0594.

6. *Kopylova G.N.* Verification of Seismo-hydrogeodynamic Effect Typifications Recorded in Wells on the Kamchatka Peninsula: The April 3, 2023 Earthquake, Mw=6.6 as an Example / *G.N. Kopylova, S.V. Boldina* // Water. 2025. V. 17. P. 634. DOI: 10.3390/w17050634.

7. *Копылова Г.Н.* Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в изменениях давления подземной воды (по данным многолетних наблюдений в скважинах Камчатки) / *Г.Н. Копылова, С.В. Болдина* // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 28 сентября – 04 октября 2025 г., г. Петропавловск-Камчатский. С. 52–57.

8. *Завьялов А.Д.* Новый способ определения характерного размера очаговой зоны / *А.Д. Завьялов, О.Д. Зотов* // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29.

9. *Solomatin A.V.* Response of Geofluid Systems to the Activization of Regional Seismicity in Kamchatka in July 2025 / *A.V. Solomatin, A.V. Kiryukhin, A.Yu. Polyakov, M.V. Lemzikov, D.N. Burnaikin, V.P. Petrochenko, G.N. Kopylova, G.V. Ryabinin, Yu.V. Demyanchuk, O.O. Usacheva* // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. ES2014. EDN: ORNLAF. DOI: 10.2205/2026es001124.