

Гидрогеодинамические эффекты в ближней и средней зонах очагов сильных землетрясений в июле-ноябре 2025 г. (по данным наблюдений в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона)

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Hydrogeodynamic effects in the near and intermediate zone of the strong earthquakes in July - November 2025 (on the observation data in the wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site)

Kopylova G.N., Boldina S.V.

Камчатский филиал ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: gala@emsd.ru

Рассматриваются изменения давления воды в глубоких (600-800 м) скважинах во время землетрясений с $M_w=5.7-8.8$. Приведены величины объемной ко-сейсмической деформации водовмещающих пород D_1 по данным регистрации давления с частотой 1 Гц в скв. ЮЗ-5, которые сопоставляются с расчетными величинами D_2 по модели дислокационного источника.

Введение и методика исследования

Наблюдения за вариациями давления подземных вод (флюидное давление P_f) являются традиционными в сейсмоактивных районах в силу высокой чувствительности P_f к изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород, включая быструю фазу их статического изменения при образовании разрывов в очагах сильных землетрясений [5]. На территории Восточной Камчатки проводится прецизионная регистрация P_f с частотой 1 Гц в четырех скважинах [2]. В июле-ноябре 2025 г. во время значительного усиления сейсмической активности в районе Восточной Камчатки, включающей землетрясения с $M_w=5.7-8.8$ (рис. 1), в наблюдательных скважинах были зарегистрированы разнообразные вариации P_f . В работе, на примере скв. ЮЗ-5, рассматриваются уникальные ко-сейсмические эффекты в изменениях P_f , соответствующие быстрой фазе статического изменения напряженного состояния водовмещающих пород во время мега-землетрясения 29 июля, $M_w=8.8$ и его сильных фор- и афтершоков; приводятся (таблица) оценки величин объемной ко-сейсмической деформации по данным скважинных наблюдений D_1 , которые находятся в удовлетворительном соответствии с расчетными величинами D_2 по модели дислокационного источника [6] с параметрами механизмов очагов по каталогу Global CMT.

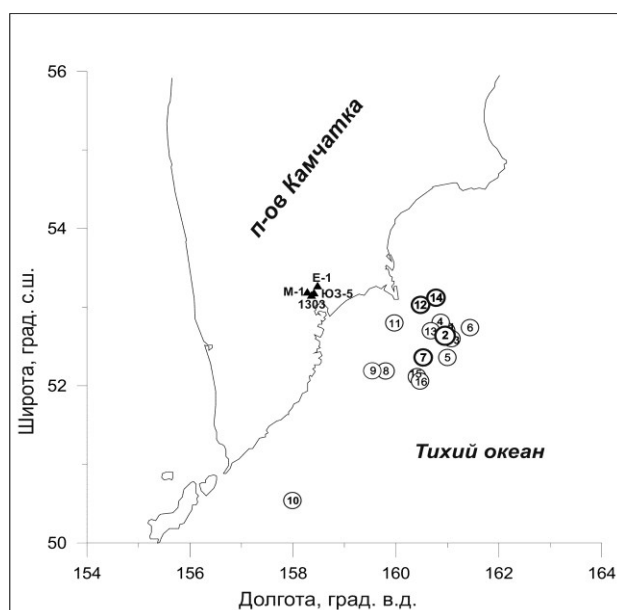


Рис. 1. Схема расположения наблюдательных скважин (треугольники) и эпицентров землетрясений с $M_w=5.7-8.8$ (кружки). Номера землетрясений соответствуют номерам в таблице. Жирной обводкой выделены номера четырех наиболее сильных землетрясений с $M_w=7.4-8.8$.

Таблица. Данные о землетрясениях, которые сопровождалась ко-сейсмическими изменениями давления воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудами $\Delta p_{\text{cos}} \geq 0.2$ гПа (июль-ноябрь 2025 г.)

№	Гипоцентр										Объемная ко-сейсмическая деформация, 10^{-9}		
	Дата дд.мм	Время чч:мин	Координаты, градусы		H , км	M_w	d_h , км	L , км	d_h/L	I	Δp_{cos} , гПа	по изменениям давления воды, D_1	D_2
			N	E									
1	20.07	06:28	52.70	160.98	5	6.6	179	37	4.8	5	-1.1	7.0	7.4
2	20.07	06:49	52.64	160.95	50	7.4	186	82	2.3	5-6	-(15.3-34)	97-215	103
3	20.07	07:08	52.60	161.08	5	6.6	189	37	5.1	4	-1.0	6.3	6.4
4	20.07	07:23	52.81	160.87	13	6.5	169	34	5.0	3	-0.9	5.7	6.3
5	22.07	01:59	52.36	161.00	39	6.1	198	22	8.8	3	+0.2	-1.3	-1.2
6	24.07	22:37	52.74	161.44	44	6.1	209	22	9.3	2	-0.2	1.3	0.9
7	29.07	23:25	52.36	160.53	44	8.8	173	327	0.5	6-7	-(277-440)	1753-2800	7500
8	30.07	00:10	52.19	159.8	37	7.0	147	55	2.7	4	-5.6	35	35
9	30.07	00:16	52.19	159.54	45	6.8	139	45	3.1	4	-4.8	30	24
10	03.08	05:38	50.54	157.99	49	6.8	295	45	6.5	3	-0.2	1.3	1.0
11	15.08	10:12	52.80	159.97	53	5.7	123	15	8.1	4-5	-0.2	1.3	0.3
12	13.09	2:38	53.03	160.48	46	7.4	145	82	1.8	5	-(9-18.7)	57-118	155
13	15.09	16:35	52.70	160.68	15	6.0	161	20	7.8	2	-0.2	1.3	1.4
14	18.09	18:58	53.12	160.78	48	7.8	164	121	1.4	5-6	-(69-126)	440-800	480
15	03.11	07:10	52.12	160.41	20	6.0	178	20	8.7	3	-0.2	1.3	1.1
16	04.11	23:29	52.06	160.47	20	6.0	185	20	9.1	3	-0.3	1.9	1.0

Примечание: d_h – гипоцентральное расстояние до скважины, км; L – размер очага землетрясения по формуле $\lg L = 0.43M_w - 1.27$ [3]; d_h/L – относительное расстояние землетрясения до скважины; I – макросейсмическая интенсивность в районе г. Петропавловск-Камчатский (по инструментальным данным КФ ФИЦ ЕГС РАН); Δp_{cos} – амплитуда ко-сейсмического изменения давления воды: «-» соответствует понижению давления воды, «+» – повышению; $D_1 = -\Delta p_{\text{cos}}/0.158$, где 0.158 гПа/ 10^{-9} – деформометрическая (приливная) чувствительность вариаций давления воды [4]; D_2 – расчетная величина объемной деформации в районе скважины по модели протяженного дислокационного источника [6] с параметрами, соответствующими механизму очага по каталогу GCMT.

В скв. ЮЗ-5 были зарегистрированы ко-сейсмические вариации давления P_f после вступления P -волн при 16 землетрясениях (таблица). Во время этих землетрясений скважина находилась в ближних ($d_h/L \leq 5$) или в средних (промежуточных) ($10 > d_h/L > 5$) зонах их очагов. Амплитуды ко-сейсмического изменения давления Δp_{cos} составляли от 0.2 гПа до 277-440 гПа. В 15 случаях наблюдалось понижение флюидного давления (рис. 2), показывающие развитие объемного расширения водовмещающих пород. Оценки величин Δp_{cos} проводились по записям давления воды с частотой 1 Гц как разность между средними значениями при вступлении P - и S -волн (рис. 3). Для четырех наиболее сильных землетрясений с $M_w = 7.4-8.8$, которые находились на минимальных относительных расстояниях от скважины $d_h/L = 0.5-2.3$, также приведены максимальные величины изменения давления в течение времени до 1.5 часов после вступления сейсмических волн (таблица, рис. 4). Для таких событий в таблице приведены две оценки величин Δp_{cos} и две оценки величин D_1 , соответственно.

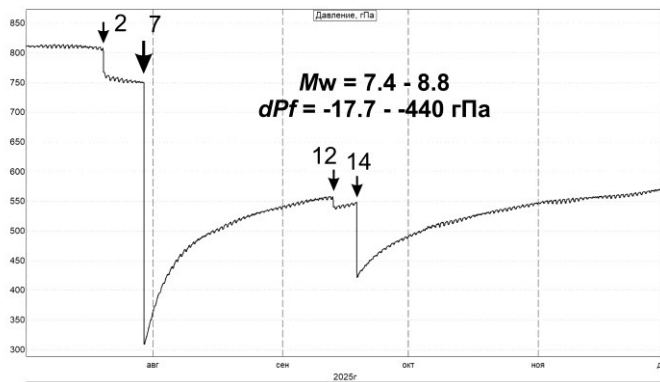


Рис. 2. Среднечасовые вариации давления воды с компенсированным барометрическим эффектом, скважина ЮЗ-5, июль-ноябрь 2025 г. Стрелками показаны землетрясения с $M_w=7.4-8.8$, цифрами – их номера в таблице.

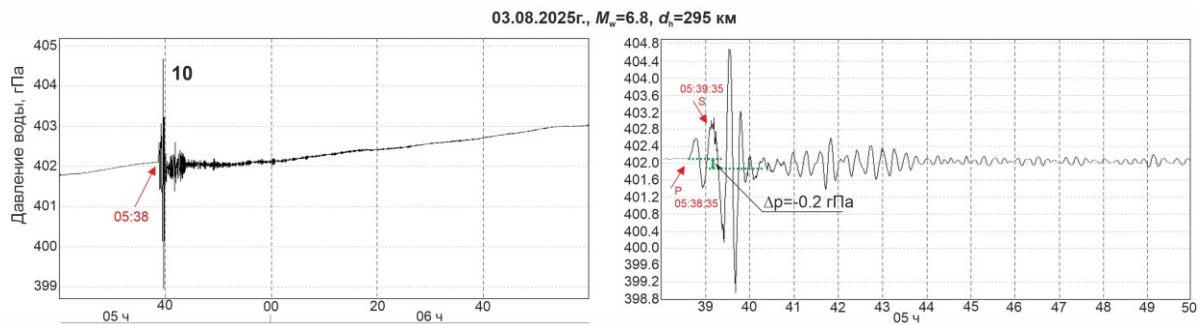


Рис. 3. Слева: вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 3 августа 2025 г. (№ 10 в таблице); справа: выделение амплитуды ко-сейсмического понижения давления $\Delta p_{\cos}=-0.2$ гПа. Красными стрелками и буквами Р и S показаны вступления продольных и поперечных волн.

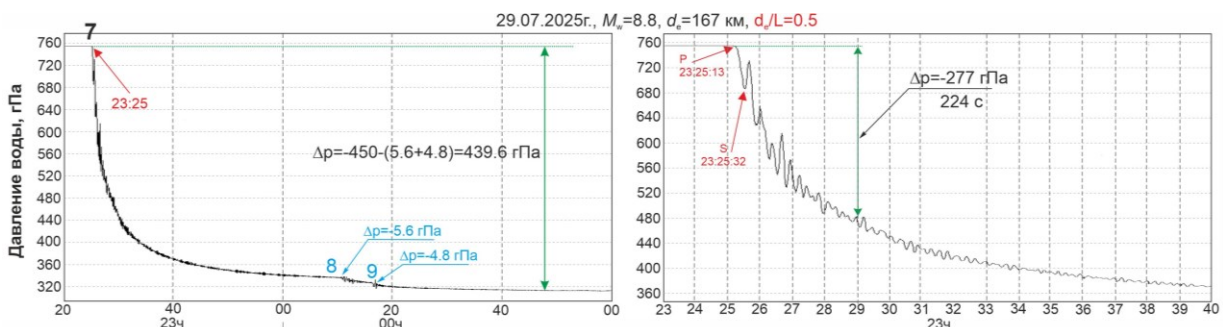


Рис. 4. Слева: вариации давления воды при мега-землетрясении 29 июля (№ 7) и оценка максимальной амплитуды ко-сейсмического понижения давления $\Delta p_{\cos}=-440$ гПа; справа: оценка минимальной амплитуды ко-сейсмического понижения давления $\Delta p_{\cos}=-277$ гПа, соответствующая понижению давления в течение прохождения объемных сейсмических волн (224 с по оценке КФ ФИЦ ГС РАН).

Результаты и выводы

Проявления ко-сейсмических изменений давления в скв. ЮЗ-5 определяются параметрами землетрясений – соотношением их магнитуд и относительных расстояний до скважины (рис. 5). Такие эффекты характерны исключительно для ближней и средней зоны очагов землетрясений.

Оценки объемной ко-сейсмической деформации D_1 в диапазоне от ед. $\times 10^{-9}$ до ед. $\times 10^{-6}$, полученные по данным измерений давления воды в скв. ЮЗ-5 с частотой 1 Гц, находятся в соответствии с расчетными величинами D_2 в пределах одного порядка (рис. 6). Это позволяет использовать данные регистрации вариаций давления воды в скважине ЮЗ-5 для выделения эффектов быстрой фазы ко-сейсмического изменения статической деформации при сильных землетрясениях и получения соответствующих количественных оценок.

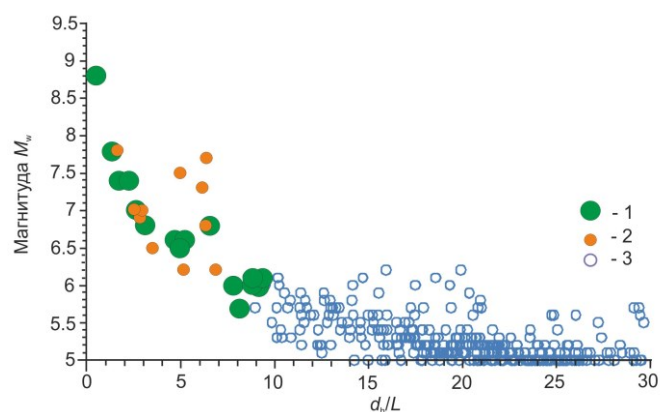


Рис. 5. Распределение землетрясений, при которых ко-сейсмические изменения давления воды в скв. ЮЗ-5 проявлялись (условные обозначения 1 и 2) и не проявлялись (3), в зависимости от величины магнитуды M_w и относительного расстояния d_v/L : 1 – землетрясения в июле-ноябре 2025 г. (таблица), 2 – землетрясения 1997-2024 гг. [1, 4], 3 – землетрясения $M_w \geq 5$ в июле-ноябре 2025 г.

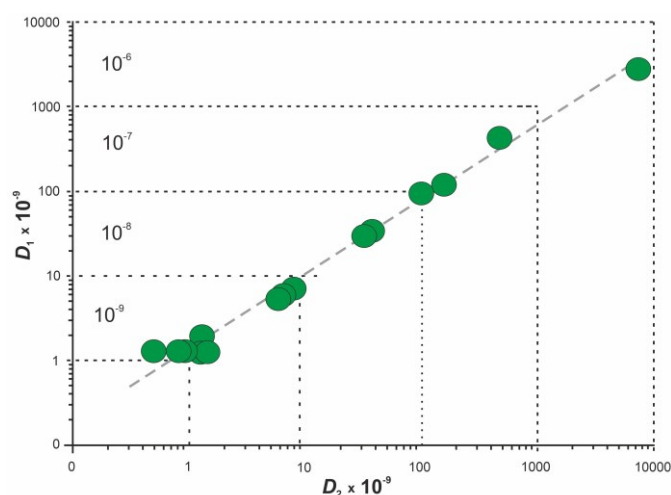


Рис. 6. Соотношение величин объемной деформации по данным о ко-сейсмических изменениях давления воды в скв. ЮЗ-5 (D_1) и полученных по модели протяженного дислокационного источника [6] с параметрами очагов землетрясений по Global CMT (D_2).

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Гидрогеологические эффекты сильных землетрясений в 2023–2024 годах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. [Электронный ресурс]: Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 28 сентября–04 октября 2025 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 32-38. <https://doi.org/10.35540/903258-536.2025.10.03>
2. Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А. Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. Ст. 0594. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0594>
3. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22-29. <https://doi.org/10.31857/S0203030621010065>
4. Kopylova G., Boldina S. Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwater Pressure Changes: A Case Study of the YuZ-5 Well on the Kamchatka Peninsula // Water. 2023. V. 15. P. 2174. <https://doi.org/10.3390/w15122174>
5. Nespoli M., Yu H., Rinaldi A. et al. Applications and future developments of the (thermo-) poro-elastic theory in geophysics // Earth-Science Reviews. 2025. V. 260. Art. 104996. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104996>
6. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. // Bulletin of the Seismological Society of America. 1992. V. 82. P. 1018-1040. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>