

ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, $M_w=6.8-9.1$, В ИЗМЕНЕНИЯХ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА

Копылова Г.Н., Болдина С.В., Касимова В.А.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru, boldina@emsd.ru, vika@emsd.ru

Введение

Сильные землетрясения сопровождаются различными формами нарушения стационарного режима природных флюидодинамических систем подземных и поверхностных вод, которые проявляются в изменениях их гидродинамических и гидрогеохимических параметров. Описание изменений уровня воды в пьезометрических скважинах при сильных землетрясениях приводится в ряде публикаций, в частности, в обобщающей работе [5] и др. Колебания уровня, его понижения и повышения различной интенсивности и длительности отражают нестационарные гидрогеодинамические процессы в системе «скважина – водовмещающая порода» при воздействии на нее сейсмических волн. Главными вопросами при изучении таких эффектов являются оценка связи между особенностями вариаций уровня воды и параметрами землетрясений, а также определение механизмов их формирования в системе «скважина – водовмещающая порода». Изучение таких эффектов позволяет оценивать характер гидрогеодинамических процессов в водовмещающих породах при воздействии сейсмических волн и проследивать изменения в состоянии флюидонасыщенной геологической среды во времени, что является актуальным при проведении геофизического мониторинга сейсмоактивных территорий.

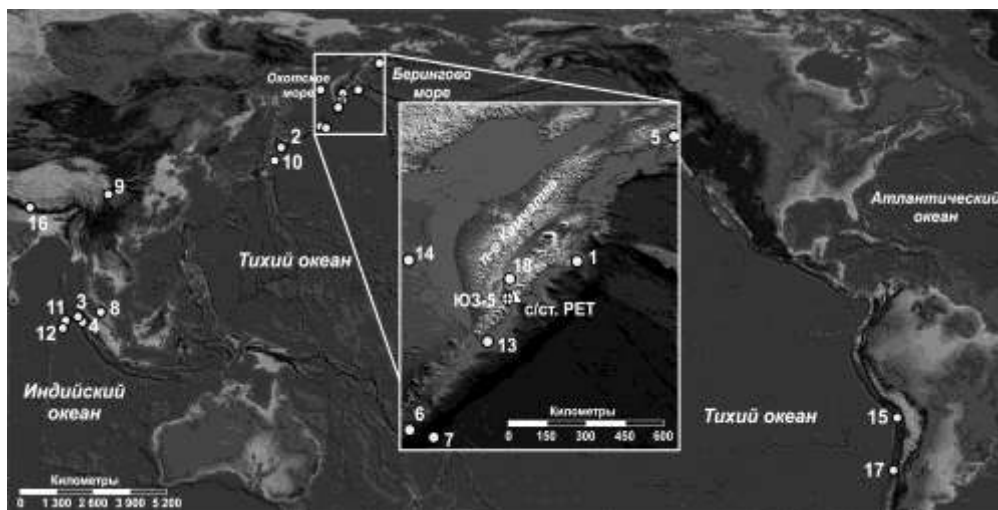


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений (табл.), скважины ЮЗ-5 и сейсмостанции Петропавловск (РЕТ) (на врезке).

В работе рассматриваются вариации уровня воды в скв. ЮЗ-5, зарегистрированные при 18-ти сильных местных и удаленных землетрясениях (рис. 1, табл.); приводится их морфологическая типизация в зависимости от параметров землетрясений и особенностей амплитудно-частотного состава сейсмических волн, записанных на ближайшей сейсмостанции Петропавловск (с/ст. РЕТ). С использованием моделирования рассматриваются механизмы формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в системе «скважина – водовмещающая порода».

Исходные данные и методика обработки

Скв. ЮЗ-5 вскрывает в диапазоне глубин 310–800 м позднемеловые отложения, представленные чередованием сланцев и аргиллитов. Уровень воды находится в 1 м ниже поверхности Земли. Водопроницаемость водовмещающих пород $T = 7.8 \text{ м}^2/\text{сут}$. Наблюдения за вариациями уровня и атмосферного давления проводятся с сентября 1997 г. с периодичностью 10–5 мин. Точность измерений уровня воды – 0.1 см. Описание скважины и аппаратного комплекса приводится в [2]. Барометрическая эффективность вариаций уровня воды составляет 0.4 см/гПа, чувствительность уровня по отношению к теоретической объемной деформации в диапазоне суточной и полусуточной групп приливных волн – $0.161 \text{ см}/10^{-9}$.

Таблица. Данные о землетрясениях (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>) и характеристика гидрогеосейсмических вариациях уровня воды в скважине ЮЗ-5. Номера землетрясений соответствуют номерам на рис. 1

№ п/п	Дата, дд.мм.гг	Время в очаге, ч:мин:с	Координаты, град		M_w	Н, км	d_e , км	Район	Характер вариаций уровня воды	Тип
			с. ш.	в. д.						
1	05.12.97	11:26:54	54.84	162.04	7.8	33	200	Камчатка	Понижение на 1 м в течение 3 мес.	IV
2	25.09.03	19:50:06	41.81	143.91	8.3	27	1670	о. Хоккайдо	Колебания в течение 1.5 ч с амплитудой 1.7 см, повышение в течение 1.5 ч с амплитудой 1 см	II
3	26.12.04	00:58:53	3.30	95.98	9.1	30	8260	о. Суматра	Колебания в течение 12 ч с амплитудой ≥ 5 см, повышение в течение 8 ч с амплитудой 2 см	II
4	28.03.05	16:09:36	2.09	97.11	8.6	30	8290	о. Суматра	Колебания в течение 5 ч с амплитудой 1 см	I
5	20.04.06	23:25:02	60.95	167.09	7.6	22	1018	Корякия	Повышение в течение 4 ч с амплитудой 1.6 см	III
6	15.11.06	11:14:13	46.59	153.27	8.3	10	812	о. Симушир	Повышение в течение суток с амплитудой 6.5 см	III
7	13.01.07	04:23:21	46.24	154.52	8.2	10	810	о. Симушир	Колебания в течение 3.5 ч с амплитудой 3 см, повышение в течение 3.5 ч с амплитудой 1 см	II
8	12.09.07	11:10:26	4.44	101.37	8.5	34	7770	о. Суматра	Колебания в течение 3.5 ч с амплитудой 0.9 см	I
9	12.05.08	06:28:00	31.08	103.27	7.9	10	5176	Китай	Повышение в течение 3 ч с амплитудой 0.9 см	III
10	11.03.11	05:46:24	38.8	142.37	9.1	29	2000	Япония	Колебания в течение 18.5 ч с амплитудой 6.6 см, повышение в течение 20.5 ч с амплитудой 4 см	II
11	11.04.12	08:38:38	2.35	93.07	8.7	33	8560	о. Суматра	Колебания в течение 24 ч с амплитудой 1.5 см	I
12	11.04.12	10:43:09	0.77	92.45	8.2	16	8760	о. Суматра	Колебания в течение 22 ч с амплитудой 0.7 см	I
13	28.02.13	14:05:51	50.93	157.34	6.8	45	260	Камчатка	Понижение на 28 см в течение 1.5 мес.	IV
14	24.05.13	05:44:48	54.89	153.22	8.3	611	720	Охотское море	Колебания в течение 18 ч с амплитудой 1.2 см, повышение в течение 7 сут. с амплитудой 9 см	II
15	01.04.14	23:46:47	-19.61	-70.77	8.2	25	13300	Чили	Колебания в течение 4.5 ч с амплитудой 0.4 см	I
16	25.04.15	06:11:26	28.15	84.71	7.8	15	6810	Непал	Колебания в течение 4 ч с амплитудой 0.5 см	I
17	16.09.15	22:54:33	-31.57	-71.65	8.3	25	14600	Чили	Колебания в течение 6.5 ч с амплитудой 0.5 см	I
18	30.01.16	03:25:10	54.01	158.51	7.2	180	80	Камчатка	Понижение на 70 см в течение 3 мес.	IV

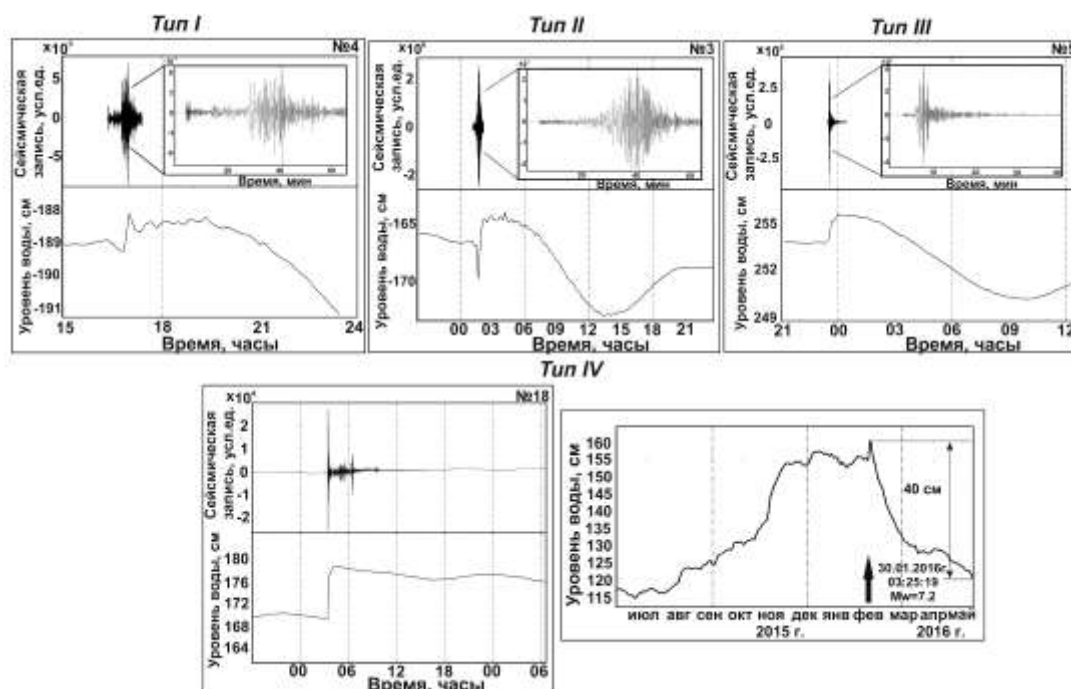
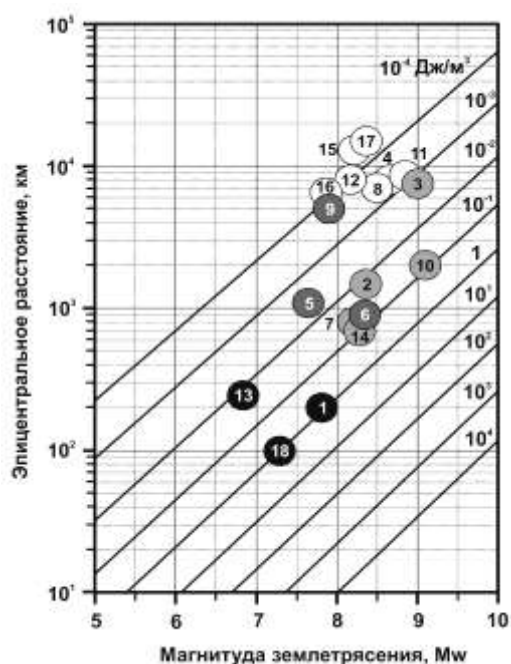


Рис. 2. Примеры гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 (типы I-IV), в сопоставлении с записями землетрясений на канале ВНЗ, с/ст. РЕТ. Номера землетрясений соответствуют табл. и рис. 1.



Во время прохождения сейсмических волн от 18-ти землетрясений с величинами магнитуд $M_w = 6.8 - 9.1$, произошедших на эпицентральных расстояниях $d_e = 80 - 14600$ км (рис. 1, табл.), в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 были выделены вариации, которые по их морфологическим особенностям (по форме) и продолжительности были разделены на четыре типа: **тип I** – вынужденные и свободные колебания в течение часов, **тип II** – колебания с кратковременным, от минут – часов до первых суток, остаточным повышением; **тип III** – кратковременные остаточные повышения; **тип IV** – длительное (месяцы) понижение уровня воды (табл., рис. 2).

Рис. 3. Распределение различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 (**тип I** – белые кружки, **тип II** – серые, **тип III** – темно-серые, **тип IV** – черные) в зависимости от параметров землетрясений M_w , d_e и величины плотности сейсмической энергии e . Цифры соответствуют номерам землетрясений на рис. 1 и в таблице.

В [5] для оценки сейсмического воздействия на природные флюидодинамические системы применялась величина удельной плотности энергии в сейсмической волне e , Дж/м³:

$$\log d_e = 0.48 M_w - 0.33 \log e - 1.4. \quad (1)$$

На рис. 3 представлено распределение выделенных четырех типов вариаций уровня воды в зависимости от соотношения величин M_w , d_e и e . Характер их распределения показывает очевидную связь особенностей вариаций уровня воды с параметрами землетрясений.

Оценку сейсмического воздействия на состояние природных флюидодинамических систем также можно проводить с использованием данных регистрации сейсмических волн широкополосной сейсмометрической аппаратурой. В работе использовались записи землетрясений на расположенной в 25 км от скважины с/ст. РЕТ (датчик STS-1) и программа DIMAS, позволяющая проводить фильтрацию и анализ записей в различных частотных диапазонах. В результате были оценены для каждого землетрясения величины максимальных амплитуд движений грунта (скоростей, смещений и ускорений) и частотных диапазонов их проявления. Рис. 4 демонстрирует распределение различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных смещений грунта на канале ВНЗ.

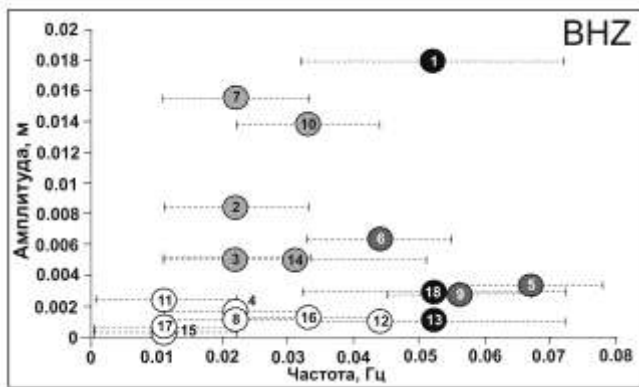


Рис. 4. Распределение различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды (тип I – белые кружки, тип II – серые, тип III – темно-серые, тип IV – черные) в зависимости от амплитуды и частотного диапазона проявления максимальных смещений грунта на канале BHZ, с/ст. РЕТ. Частотные диапазоны проявления максимальных амплитуд смещений показаны горизонтальными пунктирными линиями. Положение кружков соответствует центральной частоте полосы фильтрации. Цифры – номера землетрясений по табл. и рис. 1.

Результаты моделирования гидрогеосейсмических вариаций и оценка механизмов их формирования

Моделирование наблюдаемых вариаций уровня воды с использованием параметров водовмещающих пород, геометрических размеров наблюдательной скважины и математических зависимостей, описывающих различные виды гидрогеодинамических эффектов в системе «скважина – водовмещающая порода», позволяет построить модель формирования гидрогеосейсмических вариаций для реальной скважины, в частности, для скважины ЮЗ-5 [1].

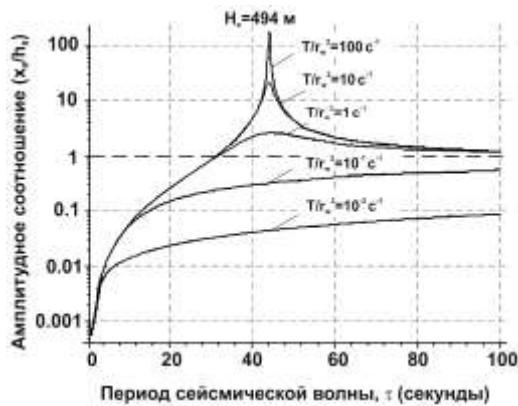


Рис. 5. Изменения амплитудного соотношения между вариациями уровня воды x_0 и напором h_0 в зависимости от периода сейсмической волны τ .

Для описания колебаний уровня воды в скв. ЮЗ-5 (типы I и II) использовалось аналитическое выражение для амплитудного соотношения между вариациями уровня воды x_0 и напором h_0 с учетом резонансного эффекта усиления вариаций порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении поверхностных сейсмических волн, приведенное в [3]:

$$A = x_0/h_0 = \left[\left(1 - \frac{\pi^2}{T\tau} \text{Kei} \alpha_w - \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} \right)^2 + \left(\frac{\pi^2}{T\tau} \text{Ker} \alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где H_e – эффективная высота столба воды в скважине, τ – период сейсмической волны, $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$ – безразмерная функция частоты, выраженная через параметры водовмещающих пород и геометрические размеры скважины: T – коэффициент водопроницаемости, S – упругая емкость, r_w – радиус скважины в области фильтра, ω – угловая частота сейсмической волны; $\text{Ker} \alpha_w$, $\text{Kei} \alpha_w$ – действительная и мнимая части функции Кельвина нулевого порядка.

На рис. 5 приводится пример моделирования колебаний уровня воды в скв. ЮЗ-5 при Суматра – Андаманском землетрясении 26.12.2004 г., $M=9.1$ (№3 табл., Тип II, рис. 2), который показывает, что колебания уровня возникают при прохождении сейсмических волн с периодами $\tau = 44.6$ с при величине параметра $T/r_w^2 \geq 1 \text{ c}^{-1}$ [4].

Кратковременное повышение уровня воды (тип III) происходит вследствие импульсного увеличения напора вблизи ствола скважины (Тип III, рис. 2). Для его описания использовалась затухающая экспоненциальная функция, характеризующая процесс течения воды без конкретизации пространственного изменения поля давления, вызывающего приток воды в скважину [1]:

$$u(t) = u_0(1 - \exp(-t/t_r)), \quad (3)$$

где u_0 – максимальная амплитуда повышения уровня воды, t – время, t_r – параметр времени релаксации давления в системе «скважина – водовмещающая порода».

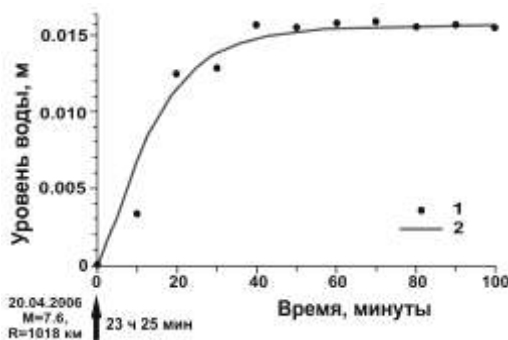


Рис. 6 Результаты моделирования повышения уровня воды в скв. ЮЗ-5 в течение двух часов после вступления сейсмических волн при Олюторском землетрясении (№ 5 табл., показано стрелкой): 1 – 10-минутные данные наблюдений; 2 – расчетное повышение уровня воды по (3).

Результаты моделирования показывают, что расчетное повышение уровня воды хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при величинах амплитуды увеличения напора $u_0 = 1.6$ см и $t_r = 14$ мин (рис. 6).

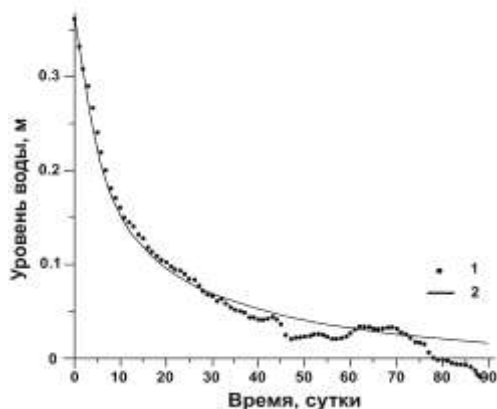


Рис. 7. Результаты моделирования понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 в течение трех месяцев после Жупановского землетрясения (№ 18 в табл.): 1 – среднесуточные данные наблюдений с компенсированными барометрическими и сезонными вариациями; 2 – расчетное понижение уровня воды по (4).

Для описания длительных понижений уровня воды в результате землетрясений с интенсивностью сотрясения $I_{msk-64} \geq 5$ баллов (Тип IV, рис. 2) использовалась модель удаленного точечного источника возмущения напора в водоносном горизонте [1]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}(R/\sqrt{4ct}), \quad (4)$$

где x – уровень воды в скважине, x_0 – начальный уровень воды в скважине, R – расстояние от скважины до источника

падения порового давления, c – пьезопроводность, t – длительность понижения уровня.

Результаты моделирования показывают, что постсейсмическое понижение уровня воды с амплитудой $\Delta h = 0.40$ м в скв. ЮЗ-5 при величине пьезопроводности водовмещающих пород $c = 0.24$ м²/с могло произойти при расстоянии до источника падения напора $R = 450$ м (рис. 7).

Обсуждение результатов и выводы

1. Проявления выделенных по морфологическим признакам четырех типов вариаций уровня воды I-IV определяются параметрами землетрясений – соотношением величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e , а также величиной плотности энергии в сейсмической волне e .

2. Особенности вариаций уровня воды при воздействии сейсмических волн от сильных землетрясений и, соответственно, проявления четырех выделенных типов гидрогеосейсмических вариаций, также зависят от амплитудно-частотного состава сейсмических волн. Низкочастотные и низкоамплитудные сейсмические сигналы сопровождаются колебаниями уровня воды (**тип I**). При увеличении амплитуды сейсмического сигнала на колебательный режим могут накладываться кратковременные повышения уровня (**тип II**). Относительно высокочастотные сейсмические сигналы сопровождаются кратковременными повышениями уровня воды (**тип III**). При увеличении амплитуды сигнала, в случаях наиболее сильных местных землетрясений, вызывающих ощутимые сотрясения интенсивностью $I_{msk-64} \geq 5$ -6 баллов, проявляются длительные (месяцы) понижения уровня воды (**тип IV**).

3. С использованием моделирования рассмотрены механизмы формирования различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5. Колебания уровня воды (**типы I и II**) возникают вследствие резонансного эффекта усиления флюидного давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении поверхностных сейсмических волн с периодами, соответствующими резонансной частоте скважины (≈ 0.023 Гц); – повышение уровня в течение десятков минут-часов после прохождения сейсмических волн (**тип III**) могут вызываться кратковременным ростом флюидного давления вследствие локального изменения проницаемости водовмещающих пород и нарушения стационарных условий течения воды в области непосредственно примыкающей к стволу скважины; – длительное понижение уровня в результате ощутимых землетрясений ($I_{msk-64} \geq 5$ баллов) (**тип IV**) может быть связано с существенными изменениями структуры водоносной системы в радиусе порядка сотен метров от скважины и увеличением проницаемости водовмещающих пород, которое сопровождалось падением флюидного давления с амплитудами до 0.03–0.1 бар.

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г., $M=6.8$ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 435-439.
2. 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. С. 43-56.
3. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // JGR. 1965. V. 70. P. 3915-3926.
4. Kopylova G.N., Boldina S.V. The Response of Water Level in the YuZ-5 Well, Kamchatka to the Magnitude 9.3, Sumatra–Andaman Earthquake of December 26, 2004 // Journal of Volcanology and Seismology. 2007. V. 1. № 5. P. 319-327.
5. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. 225 p.