



Шестая Международная конференция
«Триггерные эффекты в геосистемах»

Исследование динамики деформирования водонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии

Петухова София Максимовна

Науч. рук.: к.ф.-м.н. Горбунова Э.М.

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук
г. Москва

22.06.2022

Сведения об объекте исследования

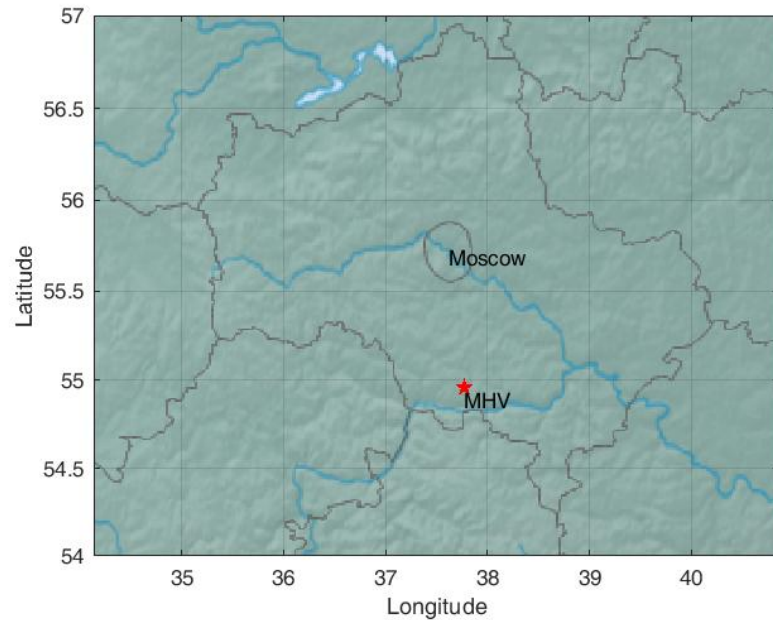


Рис. 1. Географическое расположение ГФО «Михнево»,

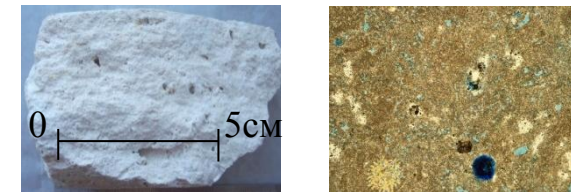
Глубина, м	Геологический индекс	Глубина залегания подошвы слоя, м		Краткое описание пород	Литологическая колонка	Уровень воды, м	Геофизическая характеристика пород	
		Глубина залегания подошвы слоя, м	Мощность слоя, м				Гамма-активность, мкр/час	Скорость пластовая, км/с
0-5	Q	0.4	0.4	Песок желтовато-серый				0.3
5-10	gIIdn	10.2	9.8	Суглинок красный, плотный, с глубины 5м-коричневый				0.75
10-15		16.6	6.4	Известняк серый, желтовато-белый			4-6	1.85
15-20				Известняк серый, желтовато-белый		25.8м	4-6	1.6
20-25	C ₁ Ip	26.5	9.9	Известняк серый, желтовато-белый			20	1.6
25-30	C ₂ ht	32.1	5.5	Глина пестроцветная			20	1.6
30-35				Известняк, мергель серый неравномерно трещиноватый кавернозный с прослоями глин		46.0м	3.8-6	1.7
35-40		44.0	11.9	Глина пестроцветная с прослоями известняков			5.8-9.2	2.2
40-45		49.3	5.3	Известняк светло-серый розовый, белый, трещиноватый			4.2-5.7	2.2
45-50	C ₂ ks C ₂ nr	56.6	7.3	Глина красная плотная с подчиненными прослоями мергеля, известняка глинистого, песчаника		68.0м	19-28	1.7
50-55				Известняк коричневый, зеленоватый с прослоями глин, мергеля, разной крепости и трещиноватости			5.8-7.2	2.1
55-60				Глина зеленовато-коричневая с подчиненными прослоями мергеля синевато-серого, известняка мергелеподобного и глинистого			12-20	2.1
60-65	C ₂ vr	76.1	19.5	Известняк коричнево-серый и серый неравномерно трещиноватый, окремненный, доломитизированный, с прослоями доломита, мергеля, глин			8-13	2.1
65-70								
70-75								
75-80	C ₂ pr	81.8	5.7					
80-85								
85-90								
90-95	C ₂ st	92.0	10.2					
95-100								
100-105								
105-110								
110-115	C ₁ al-pr	115.0	23.0					

Рис. 2. Геолого-геофизический разрез скважин

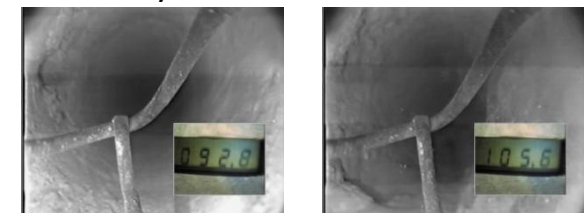
Таблица 1. Технические характеристики скважины и расчетные гидрогеологические параметры

Параметры скважин	Скважина № 1 (н)
Радиус скважины, м	0.059
Радиус обсадки скважины, м	0.0635
Глубина скважины, м	115
Вскрытая мощность пласта (интервал водопритока), м	23 (92-115)
Уровень воды в скважине от поверхности, м	69
Напор, м	23
Водопроводимость, м ² /сут (данные откачки)	4
Коэффициент фильтрации, м/сут	0.17

Образец керна с глубины 51.5 м и шлиф



Телеметрия ствола скважины на глубине 92.8 м и 105.6 м



Сведения об объекте исследования

Общий вид участка



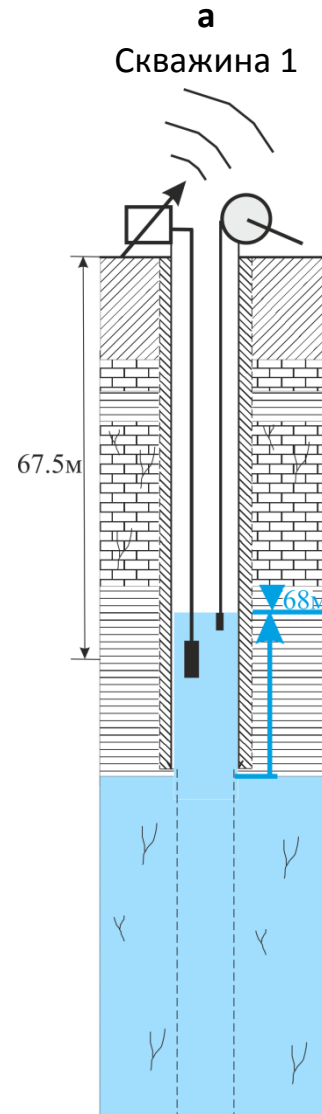
Прецизионные датчики уровня

LMP308i (sps 1 Гц,
точность 1.7 мм)

Датчик атм. давления

РАА-33х
(sps 1 Гц)

АЦП L-Card E14-440



Резонансная частота скважин
рассчитана по ф-ле:

Получено:

0.09 Гц – для напорного
горизонта (скв. 1)

0.19 Гц – для слабонапорного
горизонта (скв. 2)

$$H_e = H + 3d/8,$$

g – ускорение свободного
падения,

H – высота столба воды в
скважине,

d – интервал открытой части
ствола скважины.

Датчики (ЭУ-100)



Погружной зонд LMP 308i



Чувствительность 2,36 мВ
Частота опроса 1 Гц
Точность регистрации
уровня воды 1.7 мм

Рис. 3. Схема организации измерений на территории ГФО
«Михнево» в напорном горизонте

Часть 1. Оценка фильтрационных свойств коллектора

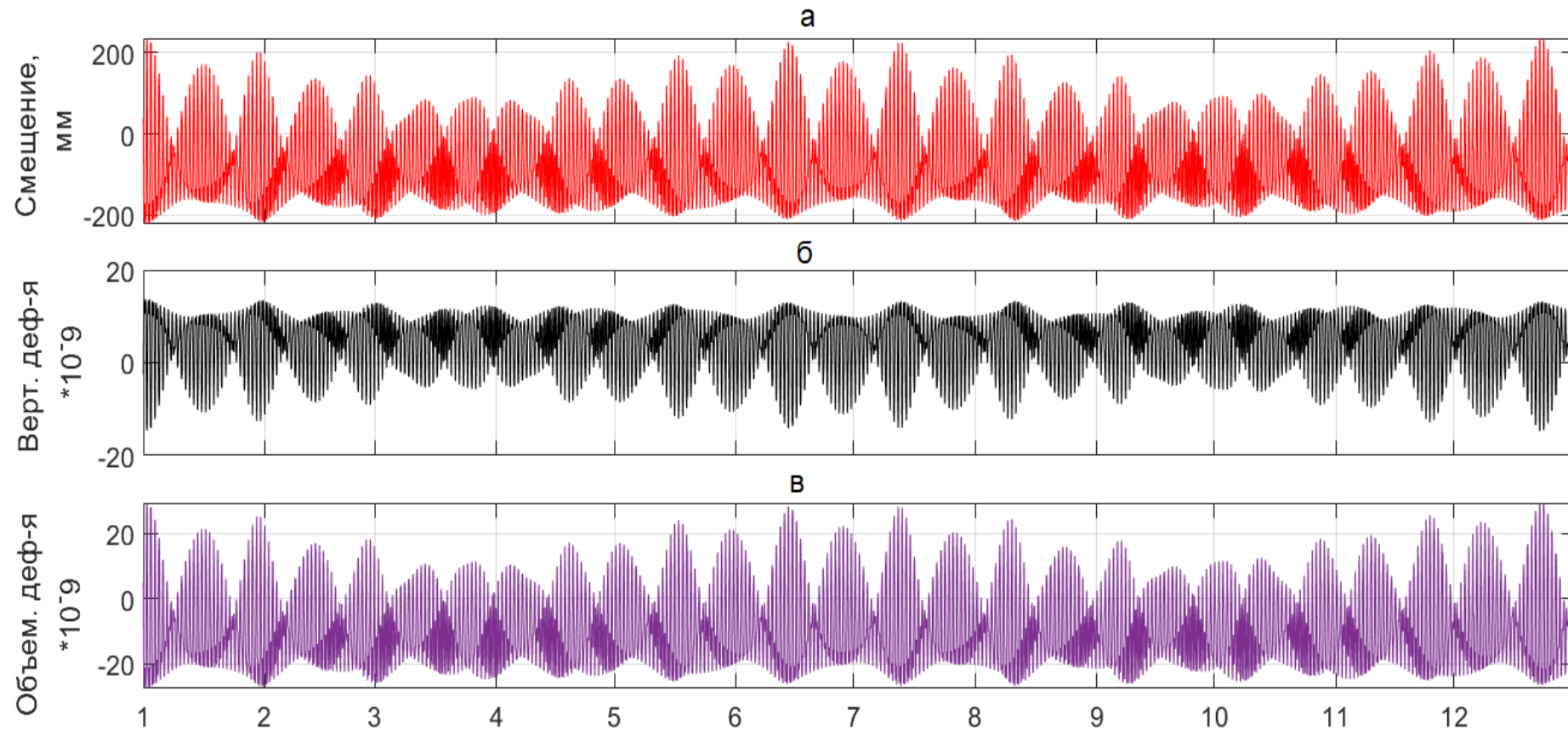


Рис. 4. Временные диаграммы смещения (а), вертикальной (б) и объемной деформации (в), рассчитанные в ETERNA [1] для ГФО «Михнево» за период 01.01.2018 – 31.12.2018

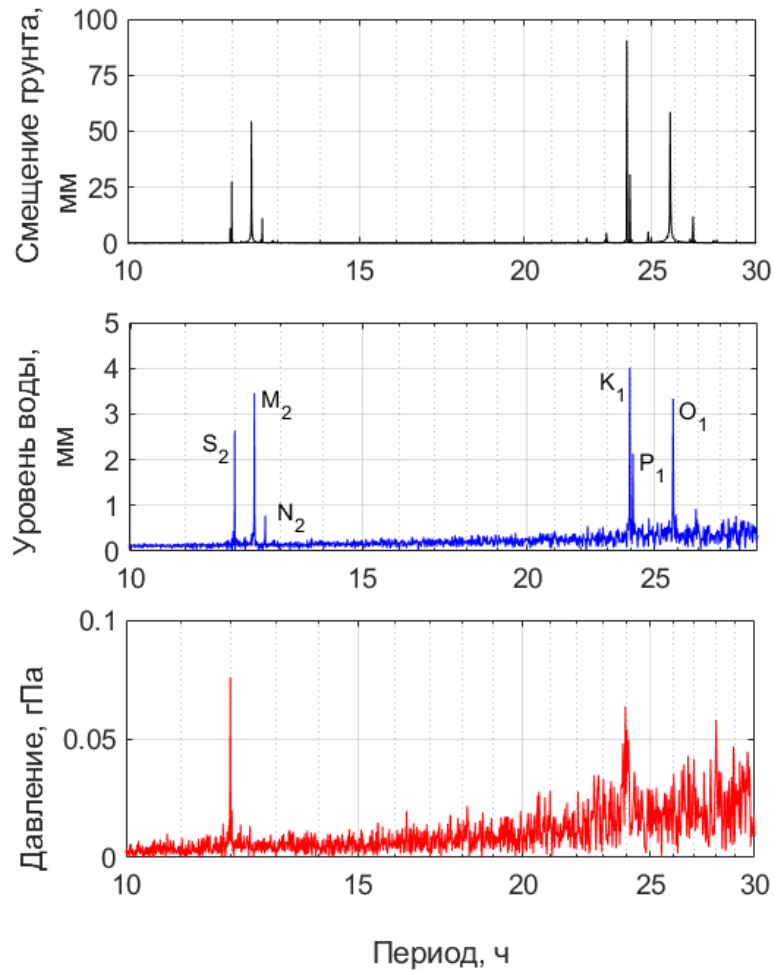


Рис. 5. Амплитудные спектры смещения грунта, уровня воды в скважине и атмосферного давления

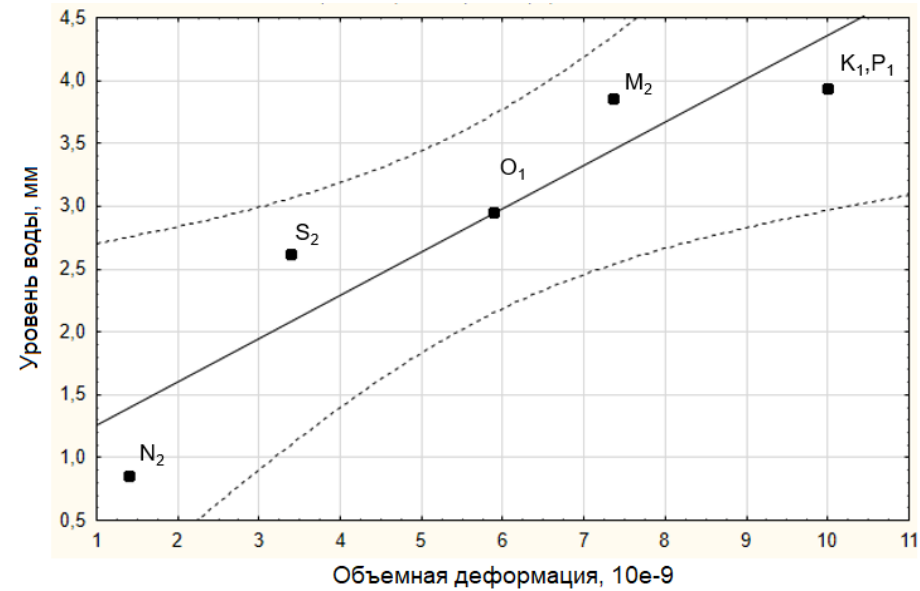


Рис. 6. Зависимость амплитуд приливных волн [2], выделенных в уровне воды от соответствующих значений теоретической объемной деформации. Пунктиром обозначен 95%-ый интервал доверительной вероятности

Линейная зависимость амплитуд приливных волн, выделенных в уровне подземных вод, от соответствующих величин объемной деформации, описывается уравнением:

$$\Delta h_t = 0.9176 + 0.3438 \Delta \varepsilon,$$

где $\Delta \varepsilon$ – объемная деформация, Δh_t – приливной отклик, который составляет $0.34 \text{ мм}/10^{-9}$ для выбранного интервала измерений.

Часть 1. Оценка фазового сдвига

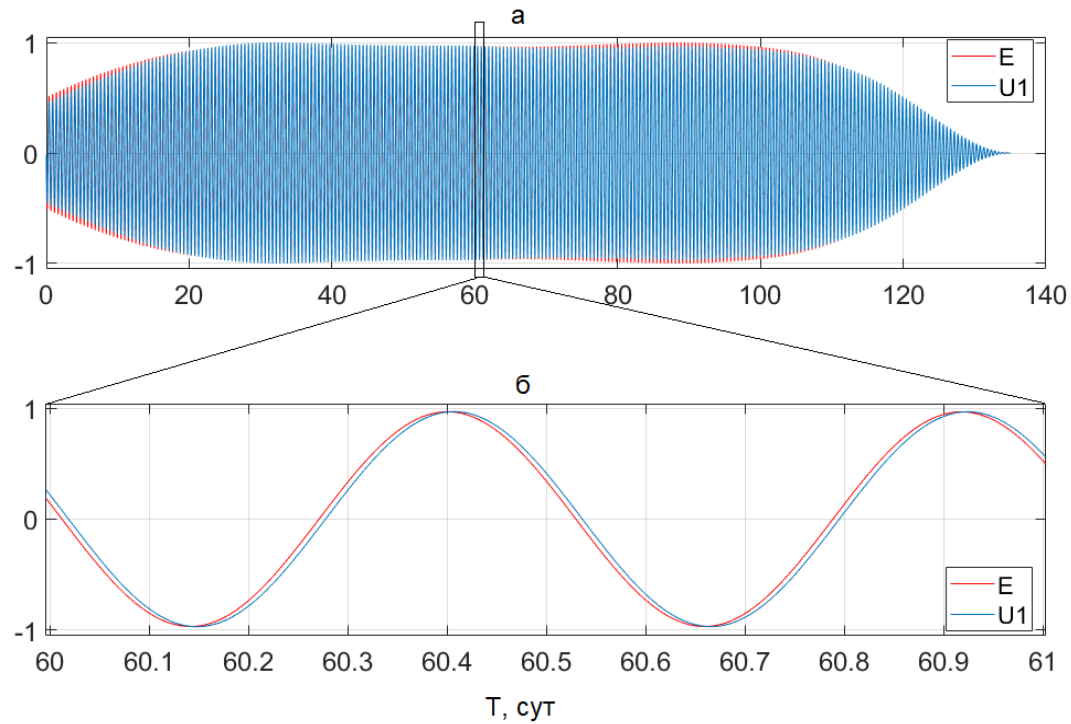


Рис. 7. Полусуточные приливные волны M_2 с периодом 12.42 ч в уровне воды и в смещении грунта (а), врезка для диапазона 60-61 сут (б). Амплитуды кривых приведены к общему масштабу

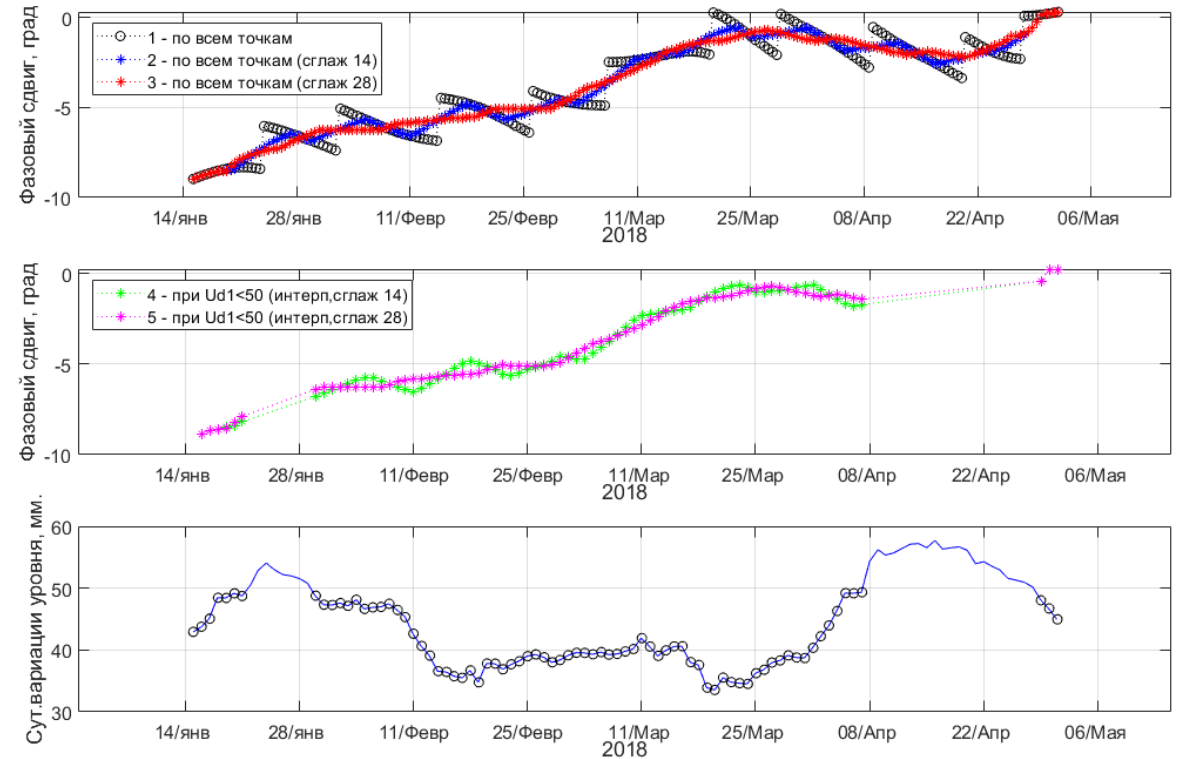


Рис. 8. Графики изменения фазового сдвига, рассчитанные по методу фазовых портретов [3] и график скорости изменения уровня воды [4]

[3] Кабыченко Н.В. Оценка фазового сдвига между приливной деформацией и вариациями уровня воды в скважине // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы. Сборник научных трудов ИДГ РАН. – М.: ГЕОС. – 2008. – С. 62-72.

[4] Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth Tide Analysis Specifics in Case of Unstable Aquifer Regime // Pure Appl. Geophys. 2017. – V. 174. – nr. 6. – DOI: 10.1007/s00024-017-1585-z

Часть 1. Определение водопродовимости

Определение водопродовимости пород (T) [Vinogradov et al., 2017] было произведено при помощи математической модели [Hsieh et al., 1987]:

$$\eta = -tg^{-1}\left(\frac{F}{E}\right), \quad (1)$$

$$E \approx 1 - \frac{\omega r_c^2}{2T} Kei(\alpha_w), \quad (2)$$

$$F \approx \frac{\omega r_c^2}{2T} Ker(\alpha_w), \quad (3)$$

где $\omega=2\pi/t$ – частота колебаний; t – период колебаний; r_c – радиус обсадной колонны, м; r_w – радиус скважины, м; T – водопродовимость, м²/сут; $Ker(\alpha_w)$ и $Kei(\alpha_w)$ – функции Кельвина нулевого порядка; $\alpha_w=(\omega S/T)^{1/2} \cdot r_w$; S – коэффициент упругой водоотдачи пласта.

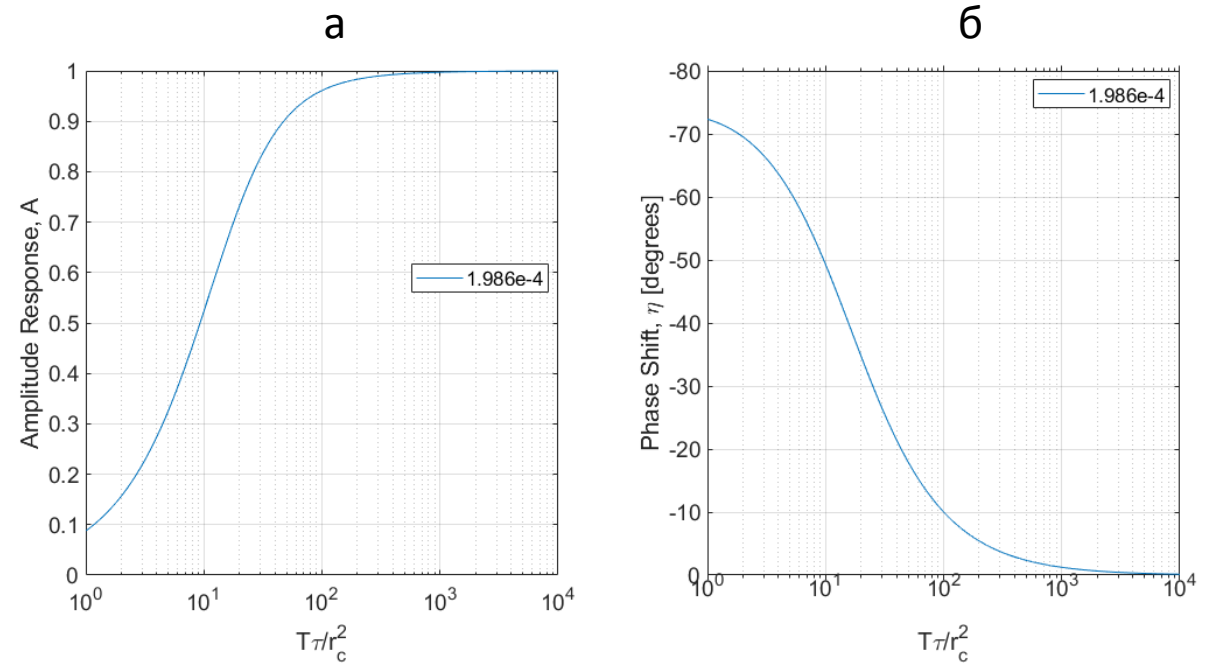


Рис. 9. Графики зависимости амплитудного отклика A (а) и фазового сдвига η (б) от параметра Tt/r_c^2 для заданных параметров скважины, полученные по [Hsieh et al., 1987]

Часть 1. Определение водопроницаемости и проницаемости

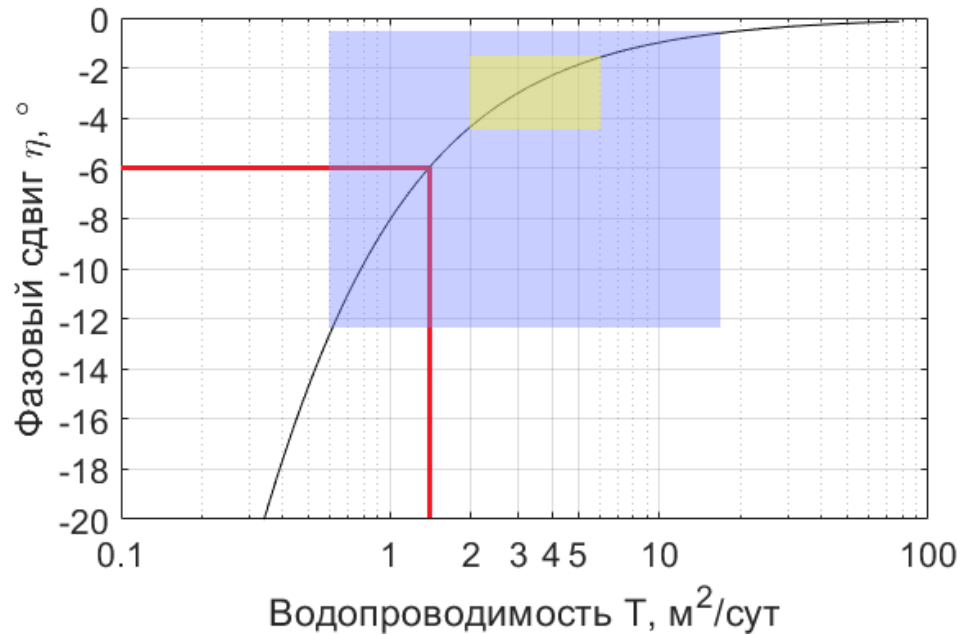


Рис. 10. График зависимости фазового сдвига от водопроницаемости. Черная линия – теоретическая кривая, рассчитанная для параметров скважины. Залитая голубым область – диапазон рассчитанных значений фазового сдвига. Красным цветом отмечено среднее значение фазового сдвига и соответствующего ему значения водопроницаемости. Залитая желтым область – диапазон значений водопроницаемости, полученных по данным пробной откачки (2006 г.)

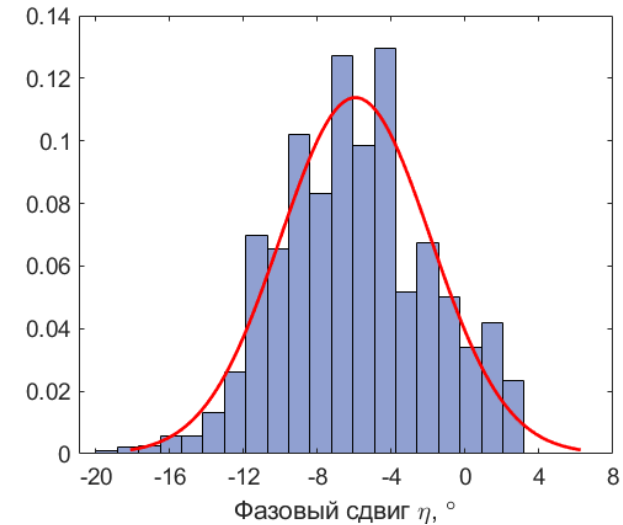


Рис. 11. Гистограмма распределения и график плотности распределения вероятностей фазового сдвига ($m = -6.0^\circ$, $\sigma = 1.9$)

Проницаемость коллектора [6]:

$$k = \frac{\mu}{\rho g d} T,$$

где: T – водопроницаемость пород, $\text{м}^2/\text{сут}$; μ – коэффициент динамической вязкости пласта; ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; d – интервал обводненной части скважины, м .

Часть 1. Результаты

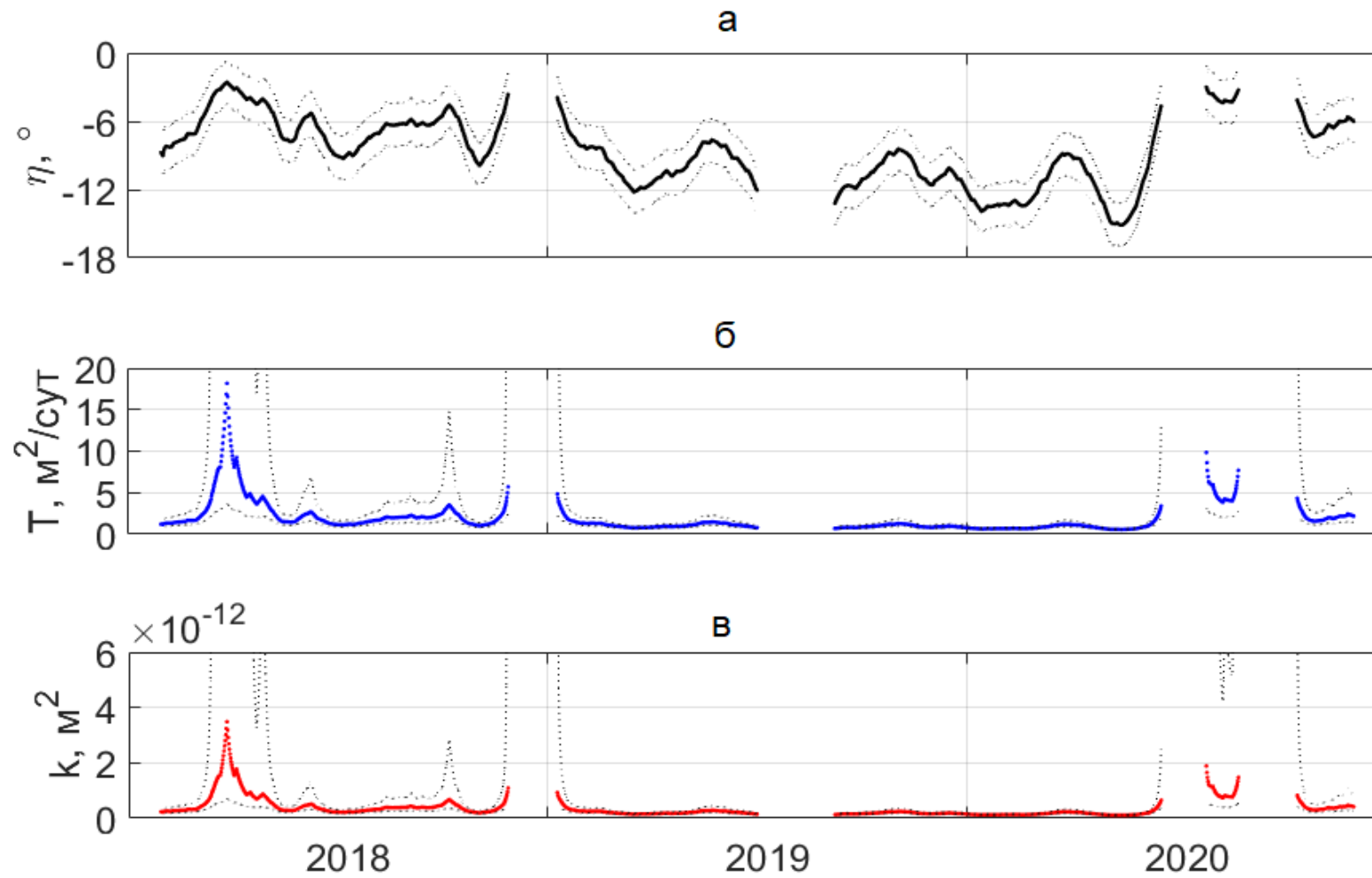


Рис. 12. Изменение фильтрационных свойств коллектора в Михнево за 2018-2020 гг.: фазовый сдвиг η (а), водопроводимость T (б), проницаемость k (в)

Таблица 2. Значения фазового сдвига, среднекв. отклонения, водопроницаемости и проницаемости для рассмотренных диапазонов

№	Временной интервал	η , °	σ	T , м ² /сут	k , м ²
1	01.01.2018 - 15.05.2018	-4.4	2.5	2.0	$3.76 \cdot 10^{-13}$
2	23.05.2018 - 18.01.2019	-4.3	3.0	1.9	$3.74 \cdot 10^{-13}$
3	24.01.2019 - 17.07.2019	-7.4	1.4	1.1	$2.11 \cdot 10^{-13}$
4	04.09.2019 - 11.02.2020	-8.6	1.1	0.9	$1.79 \cdot 10^{-13}$
5	14.02.2020 - 28.08.2020	-10.4	1.7	0.7	$1.43 \cdot 10^{-13}$
6	02.07.2020 - 31.12.2020	-2.1	1.8	4.4	$8.47 \cdot 10^{-13}$

Более высоким значениям фазового сдвига соответствуют более высокие значения водопроницаемости и проницаемости. Для временных интервалов № 1, 2, 6 диапазон значений водопроницаемости $T = (1.9 - 4.4)$ м²/сут в целом соответствует данным, полученным в результате проведенной в декабре 2006 г. пробной откачки в скважине.

Выводы

- Были оценены параметры коллектора, расположенного на территории ГФО «Михнево», такие как фазовый сдвиг, водопроводимость, проницаемость.
- Для временных интервалов № 1, 2, 6 диапазон значений водопроводимости $T = (1.9 - 4.4)$ м²/сут в целом соответствует данным, полученным в результате проведенной в декабре 2006 г. пробной откачки в скважине. Для интервалов № 3, 4, 5 различие между значениями водопроводимости, определенными по результатам экспресс-опробования скважины и рассчитанной по методу анализа фазового сдвига, может быть связано с изменением фильтрационных свойств водоносного комплекса.

Часть 2. Моделирование теоретического отклика землетрясений

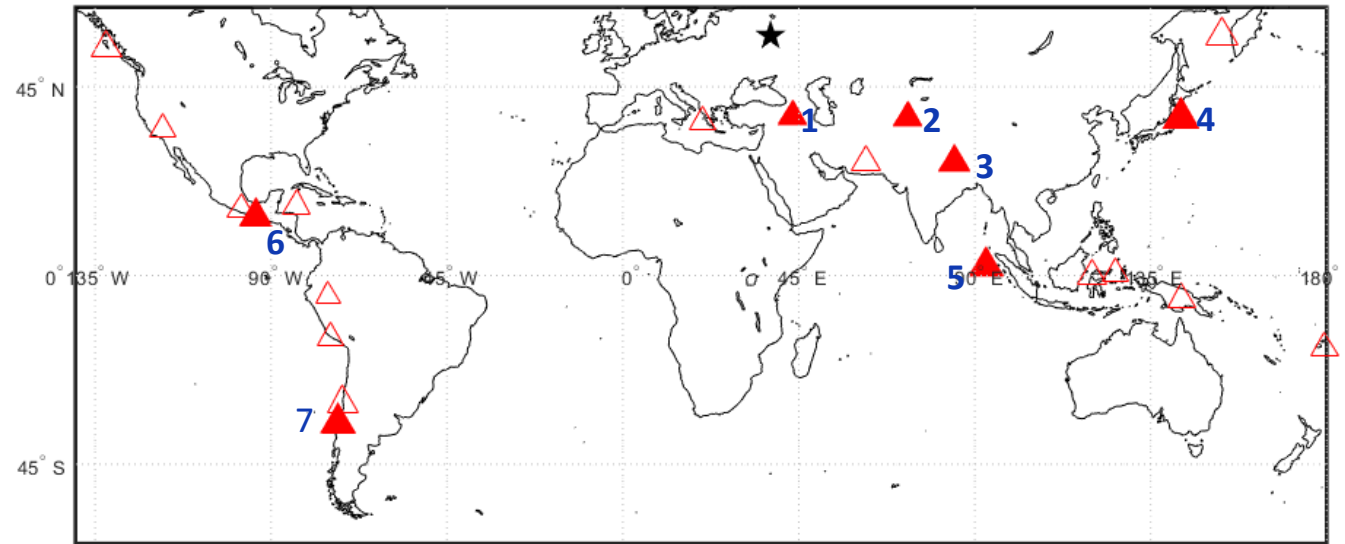


Рис. 13. Карта эпицентров землетрясений, отклики на которые были зарегистрированы на территории ГФО «Михнево» в напорном горизонте за 2010-2019 гг. (залитыми треугольниками и цифрами обозначены эпицентры исследуемых землетрясений)

Таблица 3. Параметры землетрясений

№, Дата, Регион/Тип гидрогеологического отклика	Глубина очага, км	Магнитуда M_w	Эпицентральное расстояние r , км	Плотность сейсмической энергии $e \cdot 10^{-4}$ Лж/м ³	Двойная амплитуда скорости смещения галта V_{h-n} мм/с	Двойная амплитуда уровня подземных вод, мм
1. Средиземноморско-Трансазиатский сейсмический пояс						
1) 2011-10-23 Турция/ II	15	7.1	1864	2.65	1.51	7.0
2) 2015-12-07 Таджикистан	33	7.2	3206	0.71	0.82	-
3) 2015-04-25 Непал	13	7.9	4783	2.17	0.66	-
2. Западно-Тихоокеанский сейсмический пояс						
4) 2011-03-11 Вост. побережье о.Хонсю/ III	20	9.1	7467	30.73	3.78	41.5
5) 2012-04-11 Зап. побережье Северной Суматры/III	25	8.6	7764	5.14	2.51	19.4
3. Восточно-Тихоокеанский сейсмический пояс						
6) 2017-09-08 Зап. побережье Чьяпас/ III	70	8.2	11024	0.47	2.46	8.0
7) 2010-02-27 Побережье Центр. Чили/III	23	8.8	14464	1.51	1.79	14.9

Поровое давление в условиях деформации:

$$\Delta p_f = BK_u \varepsilon_v + N \varepsilon_d$$

где ε_v - объемная деформация, $\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}$ - девиаторная деформация,

B – коэффициент Скемптона,

K_u - недренированный модуль объемной упругости [Wang, 2000],

$N = -4\mu B \left(A - \frac{1}{3} \right)$ - коэффициент связи деформации сдвига, μ - модуль сдвига.

Возмущение деформации, вызванное поверхностными сейсмическими волнами, можно рассчитать по сейсмическим скоростям:

$$\varepsilon_{RT} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_T}{\partial R} = \frac{1}{2} \frac{v_T}{V_{R,L}}$$

Объемная деформация:

$$\varepsilon_v = \frac{1 - 2\nu_u}{1 - \nu_u} \frac{v_R}{V_{R,L}}$$

Тогда поровое давление равно:

$$\Delta p_f = BK_u \frac{1 - 2\nu_u}{1 - \nu_u} \frac{v_R}{V_{R,L}} + N \frac{1}{2} \frac{v_T}{V_{R,L}}$$

$K_u \Rightarrow K$ [Wang,2000]

ν_u -коэффициент Пуассона для недренированных условий,

v_T и v_R -трансверсальная и радиальная скорости смещения грунта,

$V_{R,L}$ -скорости волны Рэлея, Лява.

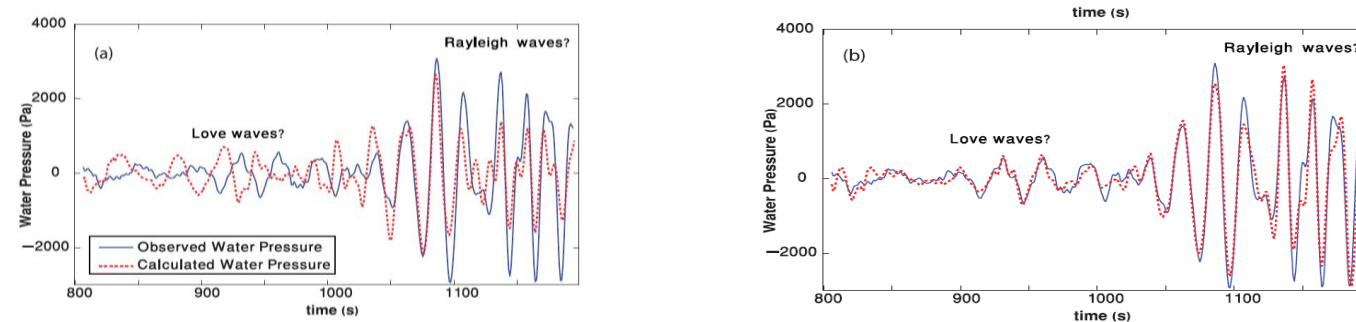


Рис 14. Наблюдаемое и расчетное давление воды в скважине (отклик на землетрясение в Пакистане $\Delta = 26.469^\circ$), (а) с учетом объемной деформации, (б) с учетом объемной и девиаторной деформации скважины Gom'e-1

Часть 2. Моделирование теоретического отклика землетрясений

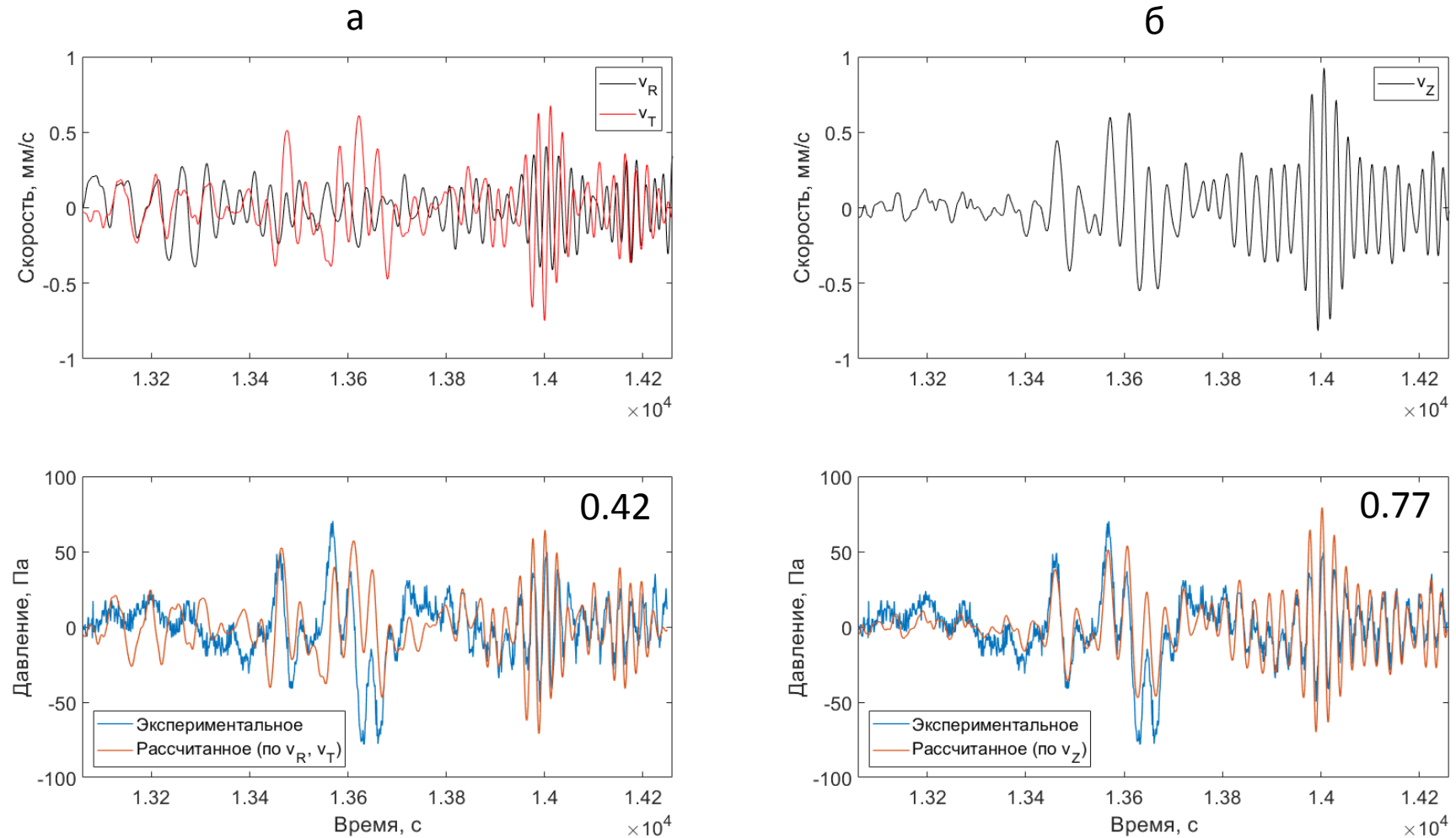


Рис. 15. Совмещенные диаграммы рассчитанной и экспериментальной форм гидрогеологических сигналов на прохождение сейсмических волн при землетрясении 27.02.2010 г. M_W 8.8 вблизи побережья Центрального Чили с учетом объемной и девиаторной деформации (а), объемной деформации (б)

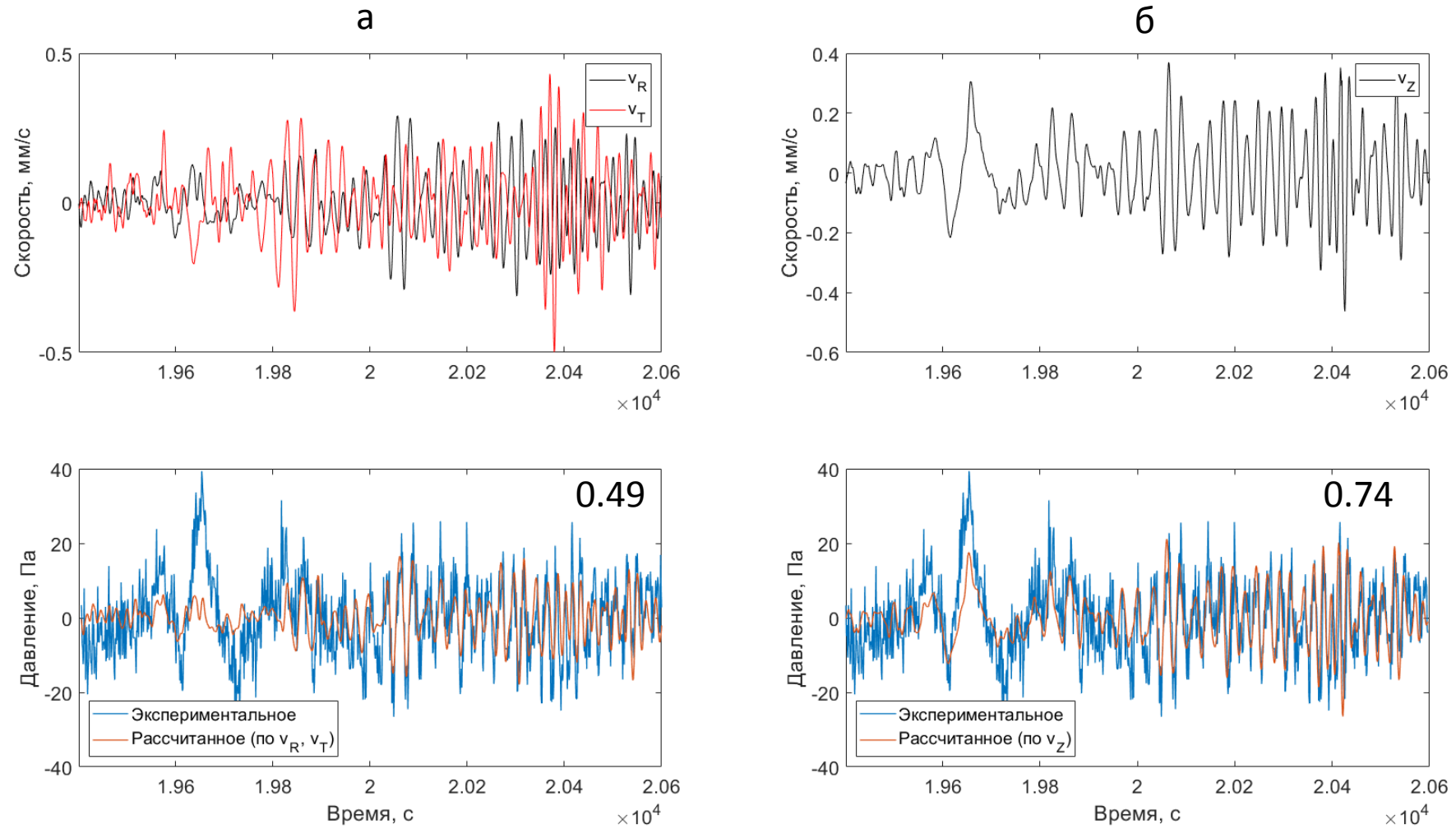


Рис. 16. Совмещенные диаграммы рассчитанной и экспериментальной форм гидрогеологических сигналов на прохождении сейсмических волн при землетрясении 11.04.2012 г. M_w 8.6 на западном побережье Северной Суматры с учетом объемной и девиаторной деформации (а), объемной деформации (б)

Таблица 4. Основные параметры землетрясений, для которых определен амплитудный фактор и рассчитаны коэффициенты корреляции между экспериментально полученным и рассчитанным поровым давлением

№, Дата, Регион/Тип гидрогеологического отклика	Глубина очага, км	Магнитуда M_w	Эпицентральное расстояние r , км	Плотность сейсмической энергии $e \cdot 10^{-4}$ Дж/м ³	Двойная амплитуда скорости смещения грунта V_p-r , мм/с	Двойная амплитуда уровня подземных вод, мм	Коэффициенты для расчета теоретического давления				
							с учетом объемной и девиаторной деформации			с учетом объемной деформации	
							$B K_u \frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}$, ГПа	N, ГПа	Коэффициент корреляции R_1	$B K_u \frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}$, ГПа	Коэффициент корреляции R_2
1. Средиземноморско-Трансазиатский сейсмический пояс											
1) 2011-10-23 Турция/ II	15	7.1	1864	2.65	1.51	7.0	0.20	0.05	0.50	0.20	0.64
2) 2015-12-07 Таджикистан	33	7.2	3206	0.71	0.82	-	0.10	0.02	0.07	0.10	0.20
3) 2015-04-25 Непал	13	7.9	4783	2.17	0.66	-	0.30	0.06	0.06	0.20	0.12
2. Западно-Тихоокеанский сейсмический пояс											
4) 2011-03-11 Вост. побережье о.Хонсю/ III	20	9.1	7467	30.73	3.78	41.5	0.15	0.10	0.22	0.20	0.72
5) 2012-04-11 Зап. побережье Северной Суматры/III	25	8.6	7764	5.14	2.51	19.4	0.20	0.05	0.49	0.20	0.74
3. Восточно-Тихоокеанский сейсмический пояс											
6) 2017-09-08 Зап. побережье Чьяпас/ III	70	8.2	11024	0.47	2.46	8.0	0.20	0.04	0.33	0.20	0.36
7) 2010-02-27 Побережье Центр. Чили/III	23	8.8	14464	1.51	1.79	14.9	0.01	0.50	0.42	0.50	0.77

- За многолетний период комплексного мониторинга, проводимого на территории ГФО «Михнево», сформирована единая база гидрогеологических, барометрических и сейсмических данных зарегистрированных землетрясений с M_w 6.4-9.1.
- Определены амплитудно-частотные характеристики гидрогеологических откликов, которые использованы при типизации выделенных гидрогеологических эффектов и отборе информативных данных для оценки пороупругих свойств водонасыщенного коллектора.
- Выполнен предварительный расчет порового давления по сейсмическим данным на основе модели пороупругости. Проведен корреляционный анализ теоретических форм гидрогеологических сигналов на прохождение сейсмических волн от 7 удаленных землетрясений с экспериментальной.

*Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5
Министерства науки и высшего образования РФ и при финансовой
поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-35-90016.*

Спасибо за внимание!