

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН»*

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2017-2018 гг.

Болдина С.В. Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.

*gala@emsd.ru, boldina@emsd.ru,
www.emsd.ru/lgi*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-05-00337
«Типизация и модели гидрогеосейсмических эффектов землетрясений по данным
уровнемерных наблюдений в скважинах (на примере Камчатского региона)», руководитель
Г.Н. Копылова.*

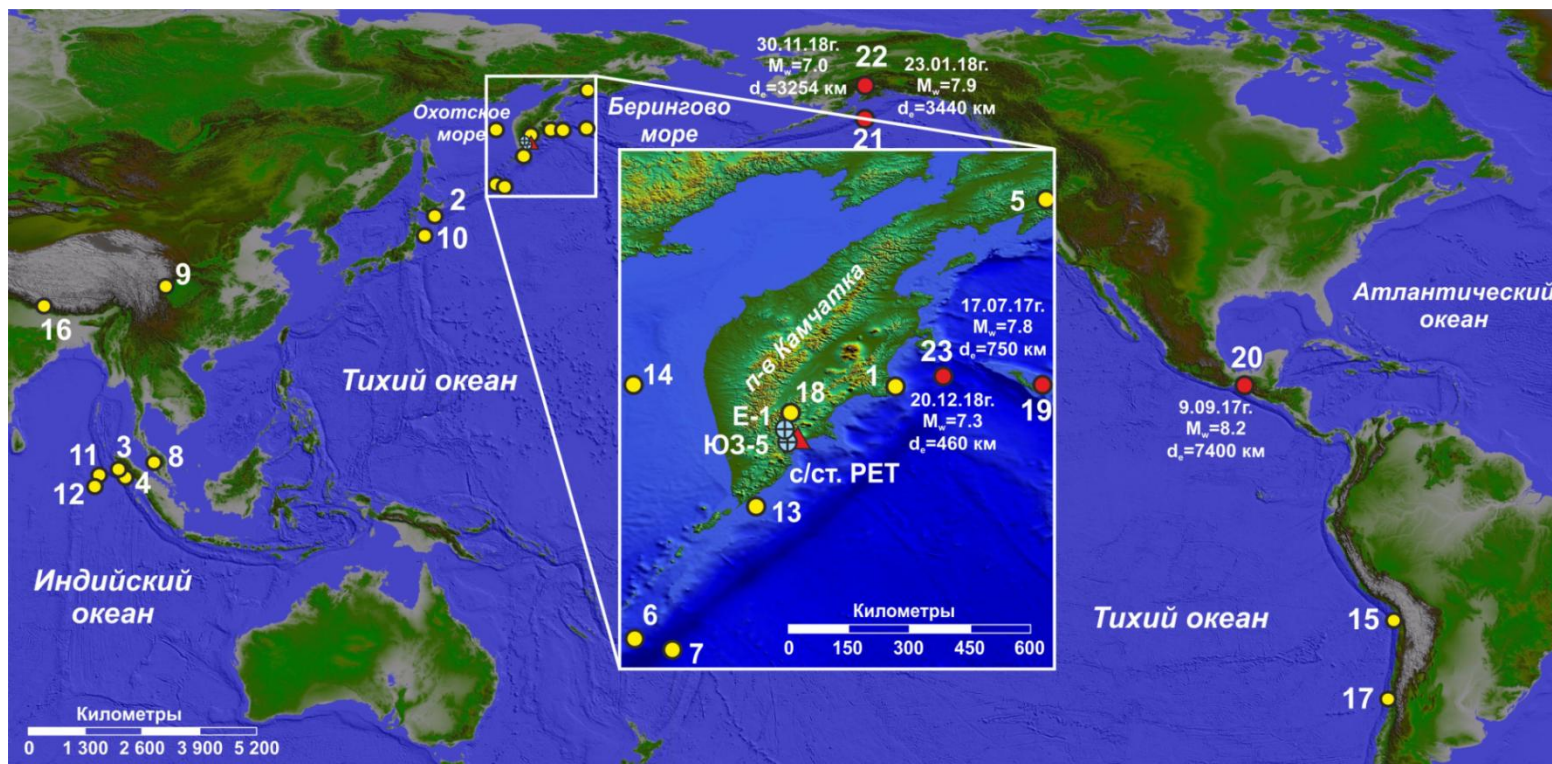
*г. Петропавловск-Камчатский
29 сентября-5 октября 2019 г.*

Введение

Развитие скважинных гидрогеодинамических исследований определяется внедрением высокотехнологичных комплексов специализированного оборудования, обеспечивающих надежную диагностику сигналов сейсмичности в изменениях параметров подземных вод для их последующего использования в задачах оценки вариаций напряженно-деформированного состояния геологической среды и прогнозирования сильных землетрясений.

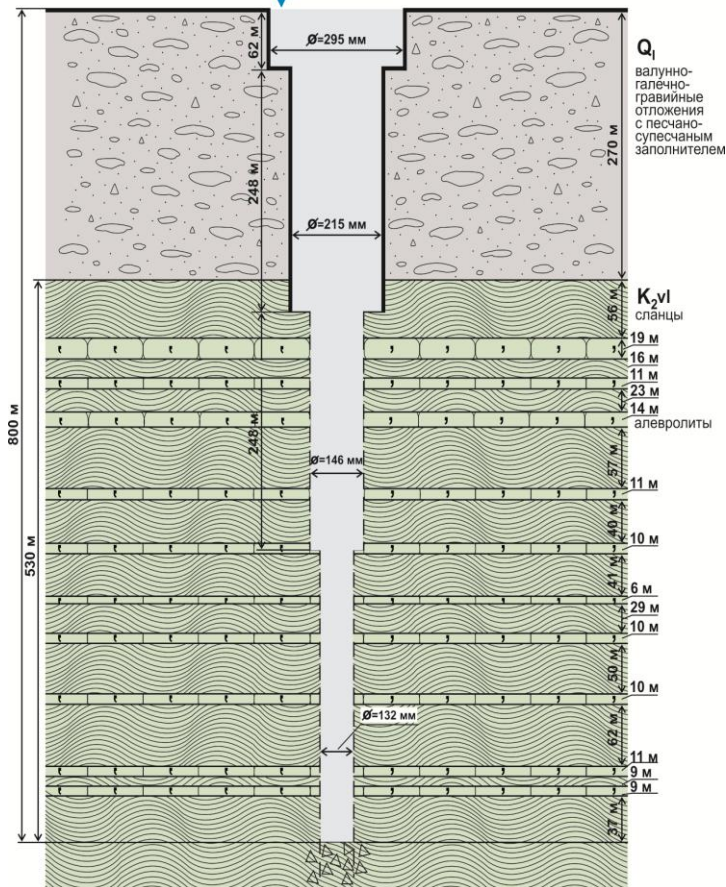
В докладе рассматриваются вариации уровня воды при 5-ти сильных местных и телесеismicких землетрясениях, произошедших в 2017-2018 гг.

Схема эпицентров землетрясений 1997-2018гг., которые сопровождались вариациями уровня воды в скважинах Камчатки



Характеристика наблюдательных скважин Ю3-5 (53.17° с.ш., 158.41° в.д.) и Е-1 (53.26° с.ш., 158.47° в.д.) <http://emsd.ru/lgi/places>

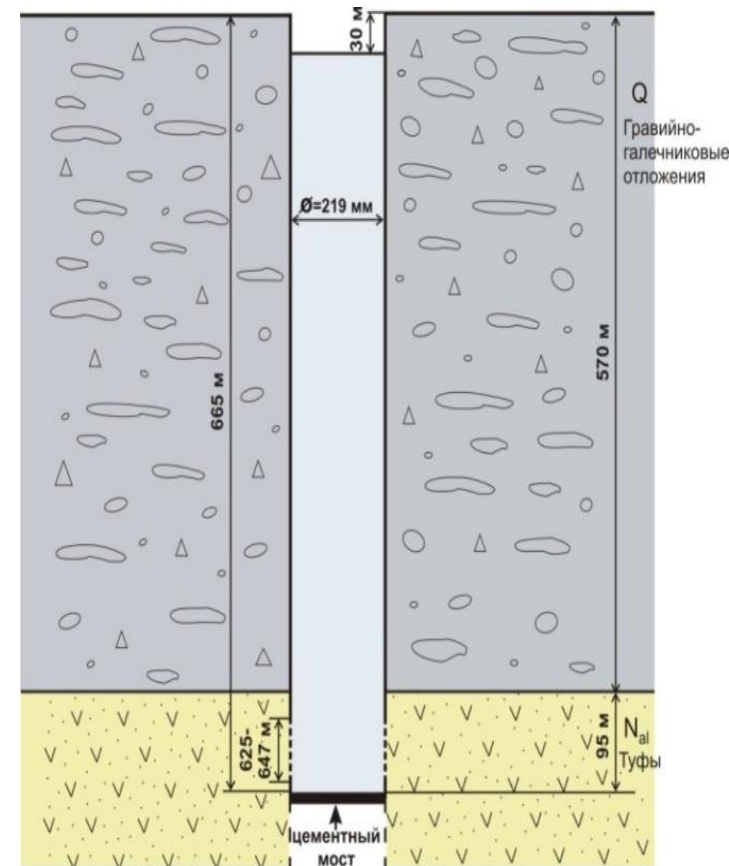
Скв. Ю3-5



Скв. Ю3-5
 Контролируемый интервал 310-800 м
 Водопроницаемость $T=7.8 \text{ м}^2/\text{сут}$
 Напорные пресные воды
 Зона активного водообмена

Скв. Е-1
 Контролируемый интервал 625-647 м
 Водопроницаемость $0.005 \text{ м}^2/\text{сут}$
 Напорные минеральные газонасыщенные ($\text{N}_2\text{-CH}_4$) воды
 Зона затрудненного водообмена

Скв. Е-1

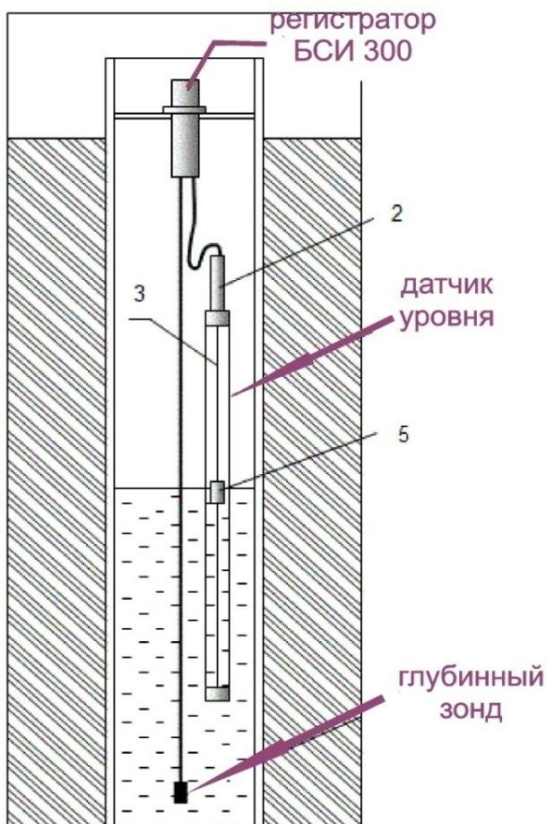


Величины упругих параметров водовмещающих пород, вскрытых наблюдательными скважинами

Скважина	Барометрическая эффективность E_b , см/гПа	Приливная чувствительность A_v , м/10 ⁻⁷	Сжимаемость β , Па ⁻¹ ·10 ⁻¹¹	Модуль сдвига G , Па·10 ¹⁰	Коэффициент Скемптона B	Упругая емкость S_s , м ⁻¹ ·10 ⁻⁷	Пористость ϕ	Водоотдача, S	Водопроницаемость T , м ² /сут
Ю3-5	0.39	0.161	15.2	0.39	0.67	21.4	0.11	21.4·10 ⁻⁵	0.005
Е-1	0.01	0.015	7.59	7.59	0.044÷0.17	29.0	0.05	5.8·10 ⁻⁵	7.8

Измерительный комплекс Кедр ДМ, 2010 г. – настоящее время

Схема размещения оборудования в скважине



Технические характеристики измерительного комплекса Кедр-ДМ
[Кедр-ДМ: комплекс для мониторинга..., 2007]

Регистратор БСИ 300	
Диапазон установки интервала измерений	5 - 60 минут
Разрешающая способность датчика атмосферного давления	0.1 гПа (0.1 см вод. ст.)
Разрешающая способность датчика температуры воздуха	0.1° С
Напряжение питания (постоянный ток)	8-15 В
Датчик уровня	
Разрешающая способность датчика уровня	0.01 см (0.1 см)
Основная погрешность измерения уровня	0.5 %
Глубинный зонд	
Разрешающая способность датчика температуры воды	0.01° С
Погрешность измерения температуры воды в диапазоне 0-100° С	0.5 %
Разрешающая способность датчика электропроводности воды	1 мСм/м
Диапазон измерения электропроводности	2-2000 мСм/м

Интервал регистрации параметров – 5 минут
Передача данных по каналам сотовой связи – 1 раз в час.
Обработка данных производится ежедневно.

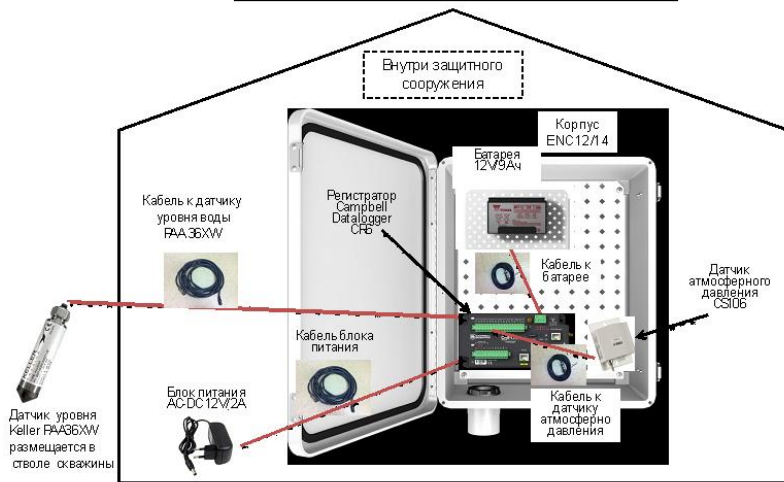


Визит делегации Геологической службы Израиля в КФ ФИЦ ЕГС РАН в июле 2017 г. и установка оборудования для регистрации высокочастотных (10 и 40 Гц) вариаций давления в скважине Ю3-5



Приложение 1

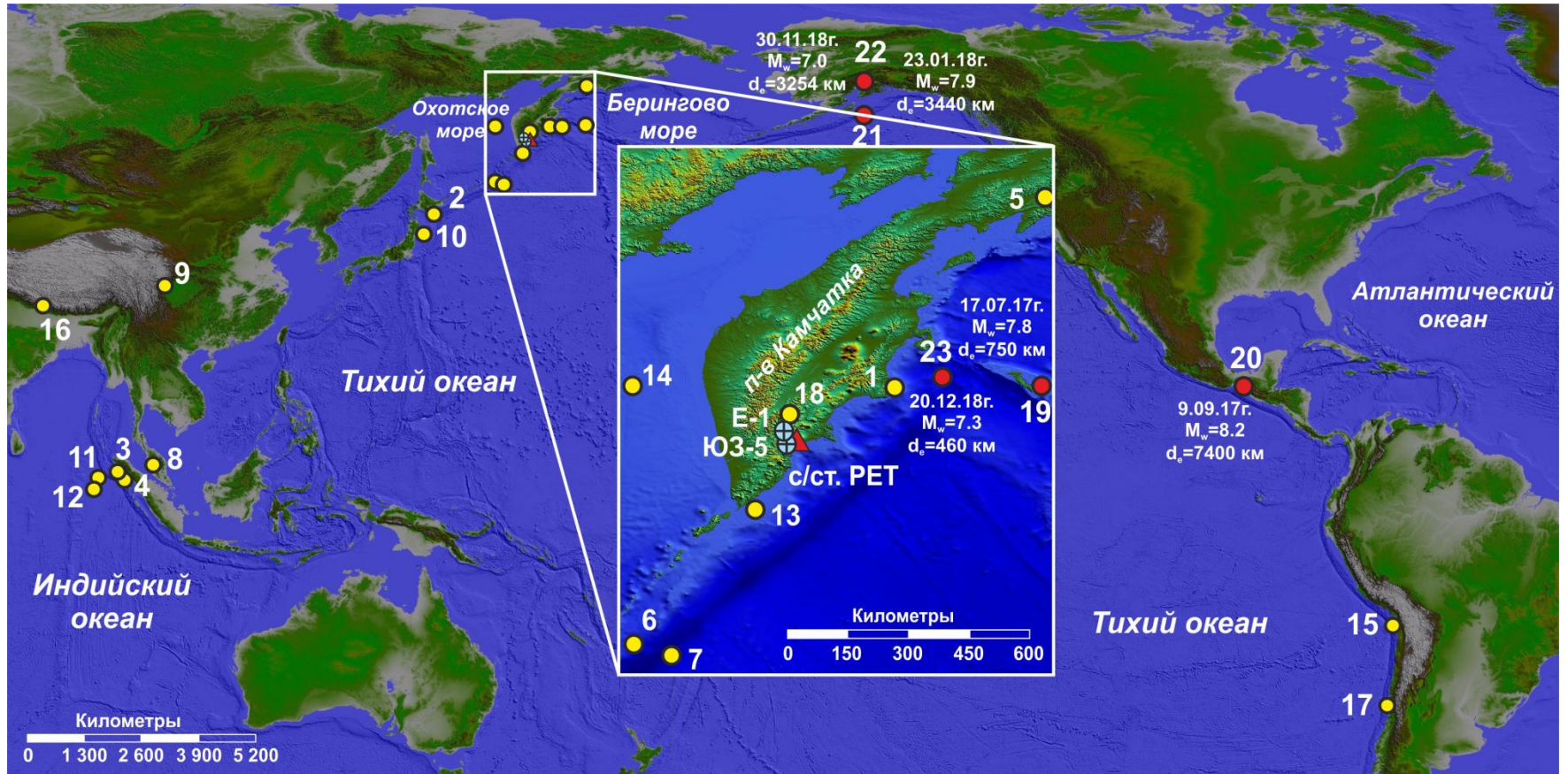
Схема размещения оборудования на скважине Ю3-5



Сентябрь 2017 г. – Новый этап модернизации оборудования. В рамках Научно-технического соглашения с Геологической службой Израиля в скв. Ю3-5 было установлено оборудования в составе регистратора данных CR6 и барометра CS106 (PTB110) Campbell Scientific, Inc. (США); датчика давления воды PAA 36XW Keller (Швейцария); регистрация давления воды проводилась с частотой 10 и 40 Гц.

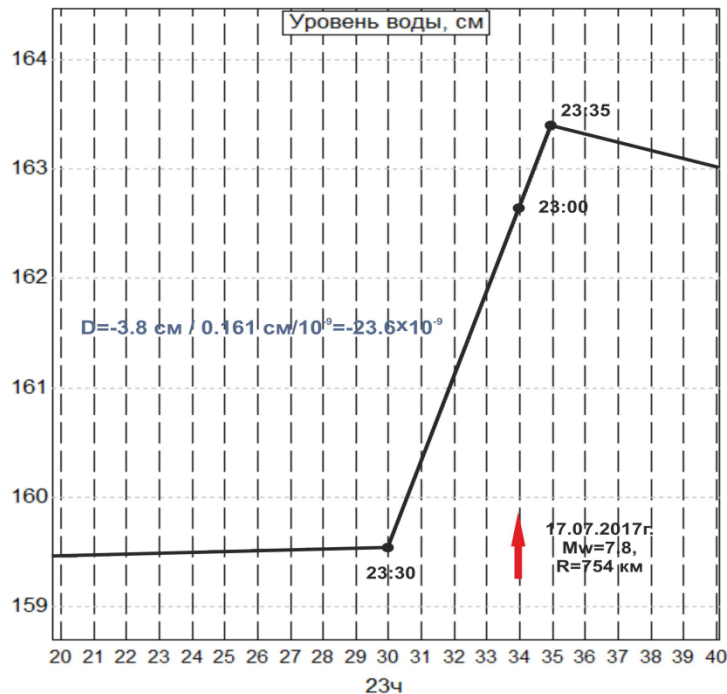
Октябрь 2018 г. – Установка на скв. Ю3-5 оборудования производства Швейцарии в составе регистратора данных GSM2 и датчика давления, температуры и электропроводности воды 36XiW Keller; регистрация давления воды с частотой 1 мин с телеметрической передачей данных.

Схема расположения скв. Ю3-5, Е-1, с/ст. РЕТ и эпицентров землетрясений 1997-2018 гг.

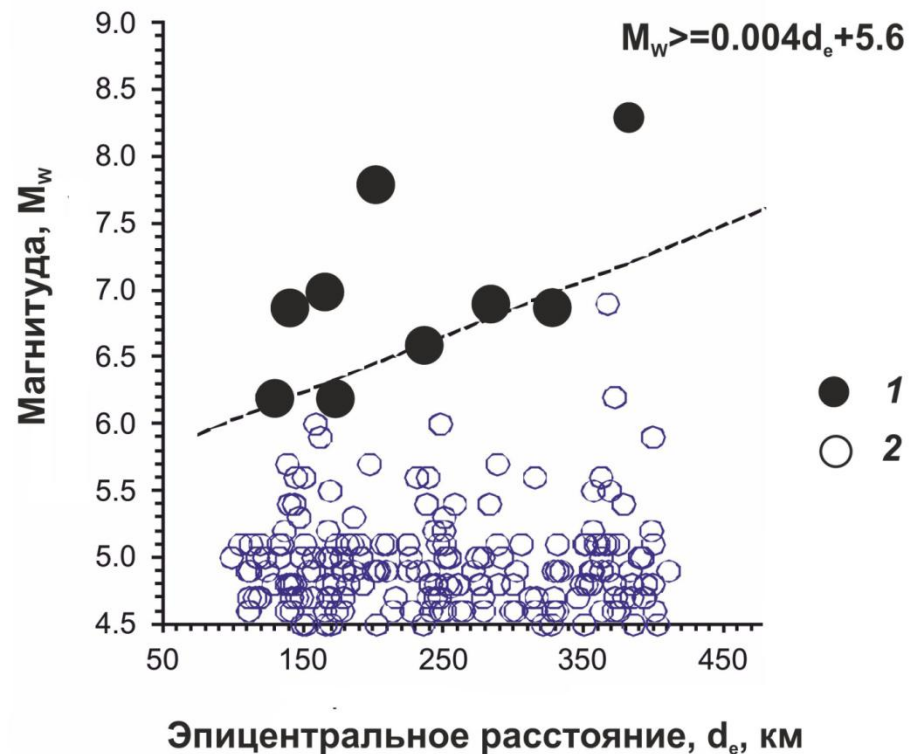


Дата, дд.мм.гг	Время в очаге, ч.мин.с	Координаты, град		M_w	H , км	d_e , км	Район	Характер вариаций уровня воды
		с. ш.	в. д.					
17.07.17	23:34:13	54.44	168.86	7.8	10	750	Камчатка (Алеуты)	Косейсмический скачок повышения уровня на 3.8 см
09.09.17	4:49:21	15.07	93.72	8.1	70	7400	Мексика	Колебания в течение 1-2 ч с амплитудой ≥ 2 см
23.01.18	09:31:42	56.05	-149.07	7.9	25	3440	Аляска	Колебания в течение 2 ч с амплитудой 1.5 см
30.11.18	16:09:36	61.35	-149.96	7.0	46	3254	Аляска	Колебания в течение 20 мин. с амплитудой 0.5 см
20.12.18	17:02:02	54.95	164.85	7.3	16	460	Камчатка (Командоры)	Косейсмический скачок повышения уровня на 3.2 см

Зависимость проявления косейсмических скачков в вариациях уровня воды в скв. Ю3-5 от магнитуды и эпицентрального расстояния



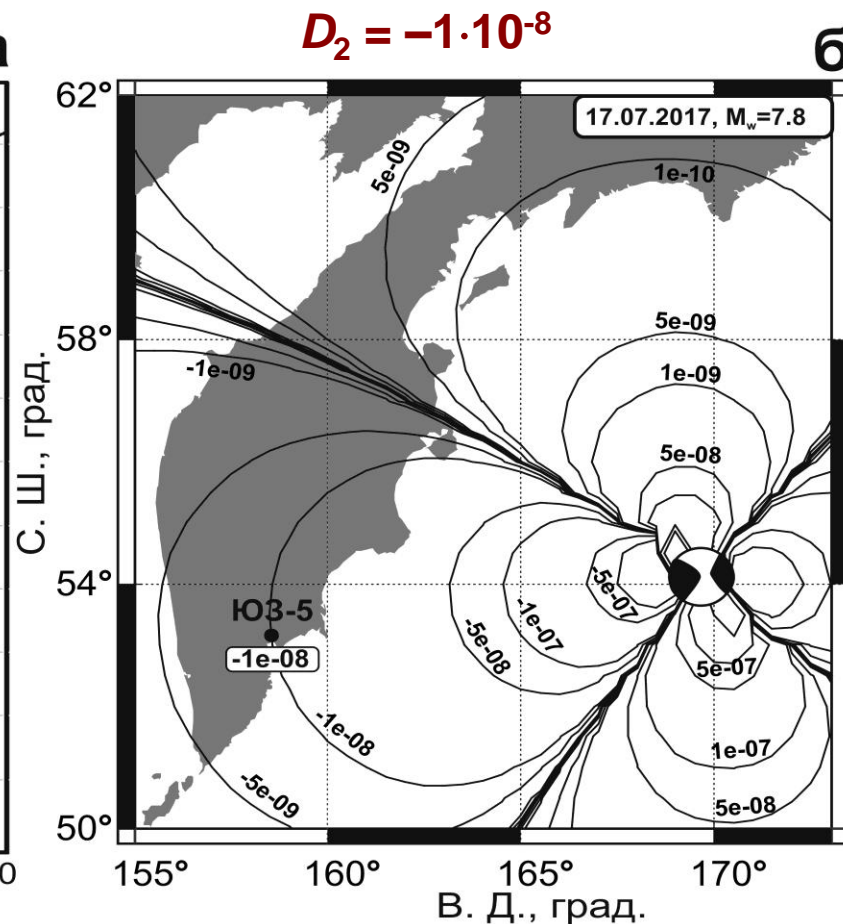
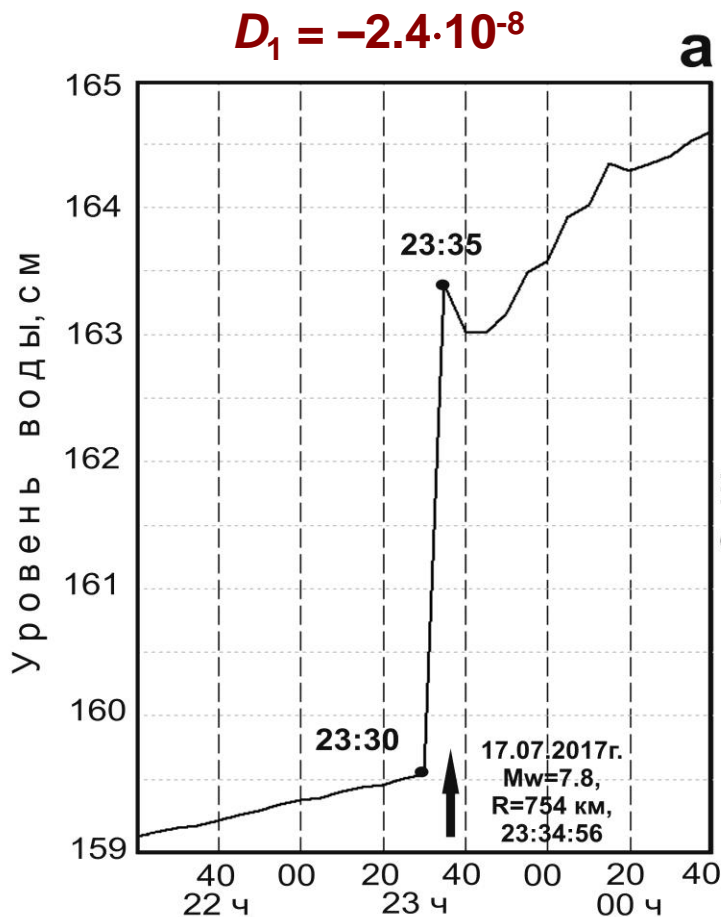
При землетрясении 17 июля 2017 г. , $M_w = 7.8$ (Ближне-Алеутское) косейсмический скачок проявился на эпицентрального расстоянии $d_e = 750$ км, которое примерно в два раза превышает эпицентральные расстояния других землетрясений, сопровождавшихся косейсмическими скачками уровня воды в этой скважине.



Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине Ю3-5, в зависимости от величин их магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e , км :

1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды в скв. Ю3-5; 2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня не были зарегистрированы

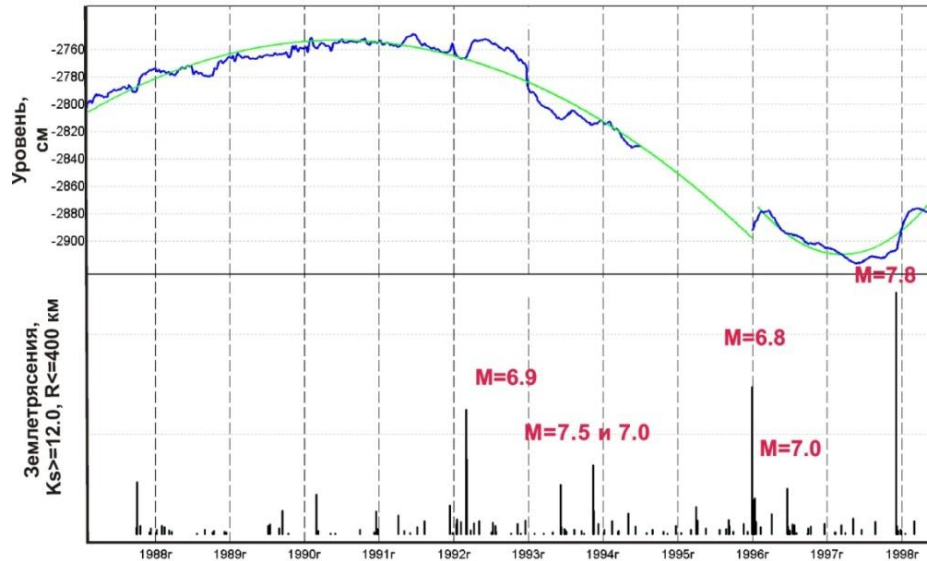
Землетрясение 17 июля 2017 г. с $M_w = 7.8$. $d_e = 750$ км (Ближне-Алеутское)



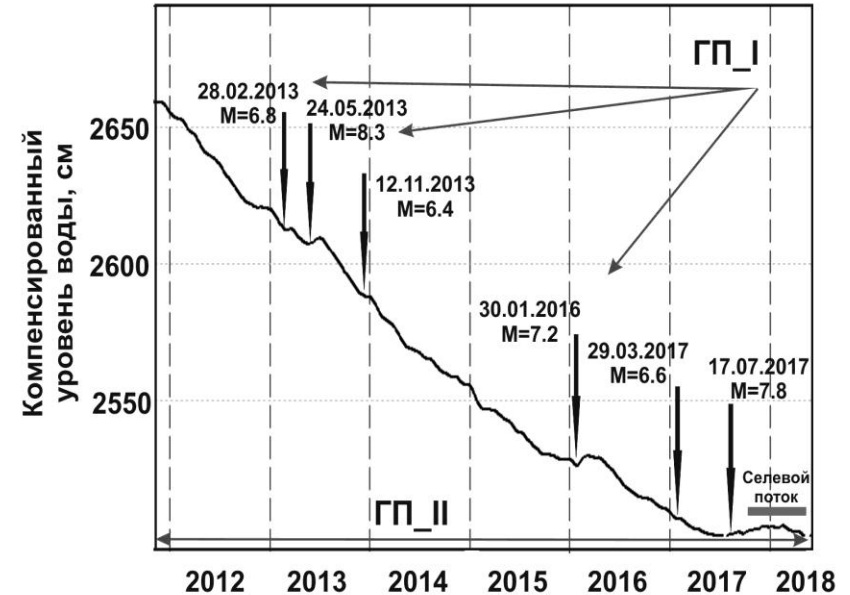
Косейсмическое повышение уровня воды в скв. ЮЗ-5 в результате землетрясения 17 июля 2017 г. (момент землетрясения показан стрелкой с указанием времени вступления сейсмических волн на с/ст. РЕТ).

Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника с параметрами механизма очага СМТ землетрясения 17 июля 2017 г. (<http://www.globalcmt.org/>) с указанием величины деформации в районе скв. ЮЗ-5 (показана черным кружком).

Гидрогеодинамический предвестник ГП_II в форме длительного (годы) понижения уровня воды в скв. Е-1 проявлялся два раза: в 1991-1997 гг. (слева) и в 2012-2018 гг. (справа)



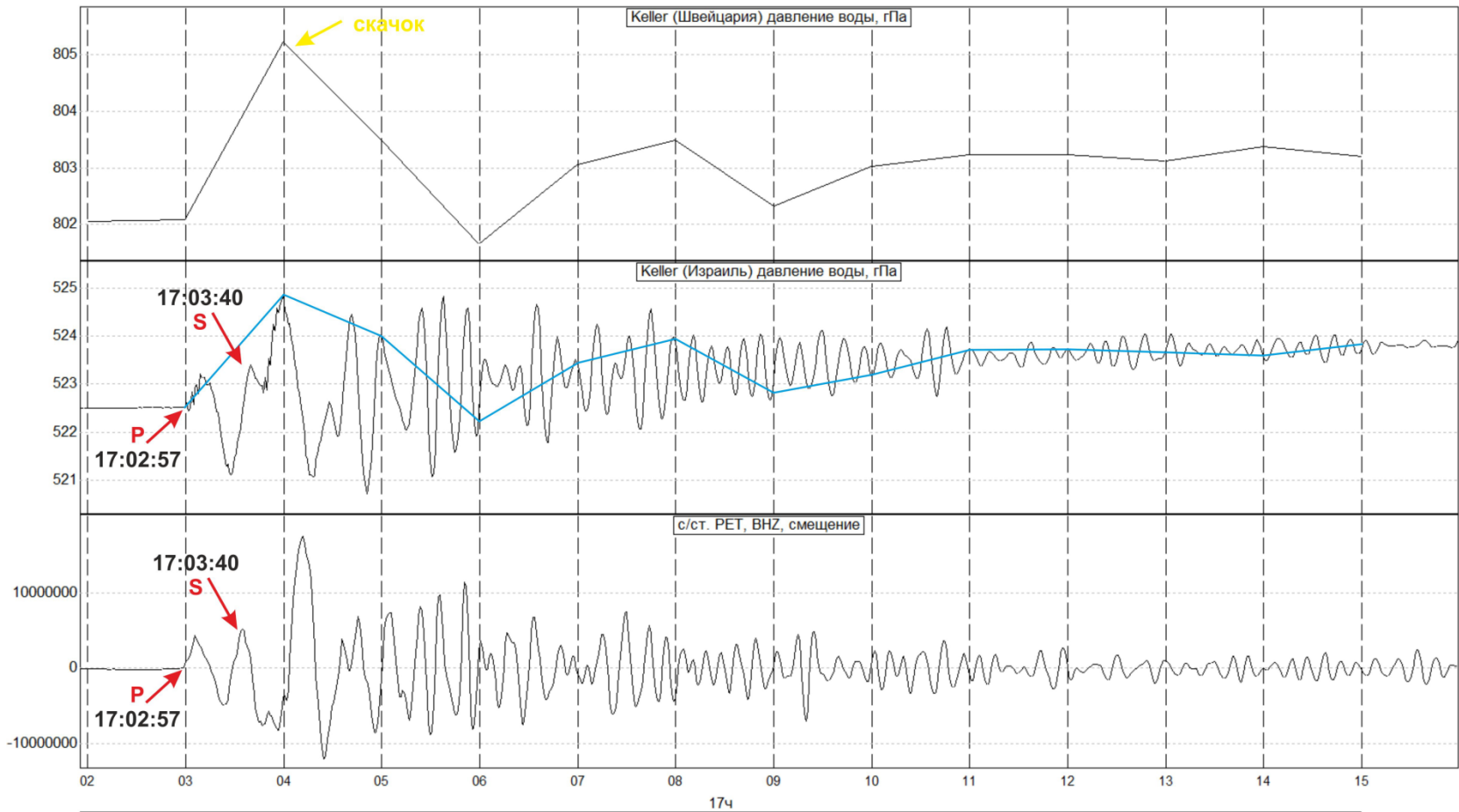
Развитие тренда понижения уровня воды в скв. Е-1 в течение времени до 6-ти лет, предшествующее и сопутствующее возникновению на Камчатке группы сильных землетрясений с M порядка 7 и более в 1992-1997 гг. [Копылова, 2001]



Понижение уровня воды в скв. Е-1 в 2012-2017 гг., соответствующее гидрогеодинамическому предвестнику ГП_II. На фоне тренда понижения уровня выделяются менее продолжительные его понижения, вызванные подготовкой землетрясений 28.02 и 24.05.2013 г. и 30.01.2016 г., соответствующие гидрогеодинамическому предвестнику ГП_I [Копылова, Болдина 2019]

Мы полагаем, что понижение уровня в 2012-2017 гг. отражало геодинамическую обстановку роста напряженного состояния среды в районах Камчатской островной дуги и ее сочленения с Алеутской островной дугой, предшествующее усилению сейсмической активности 2013-2016 гг. и возникновению Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г. с $M_w = 7.8$.

Землетрясение 20 декабря 2018 г., $M_w = 7.3$, $d_e = 460$ км (Углового поднятия)

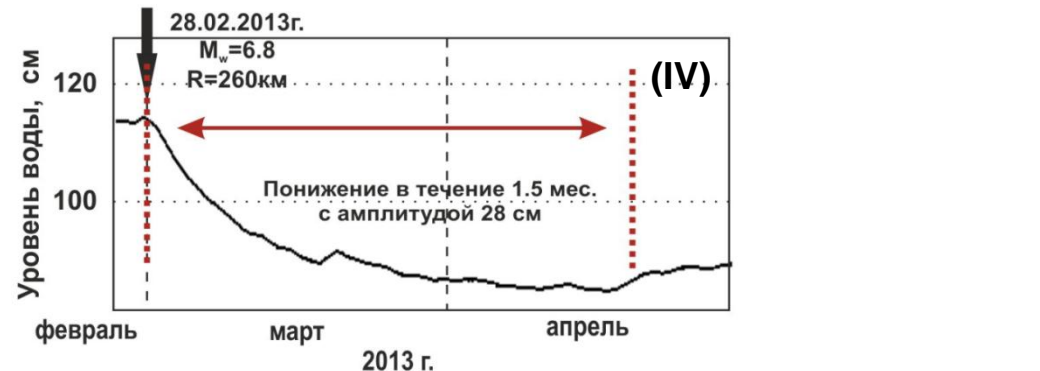
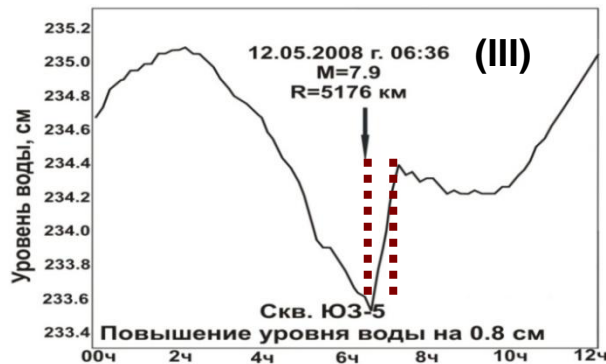
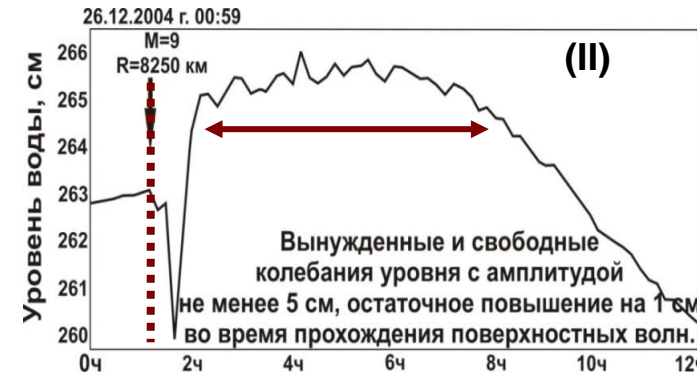
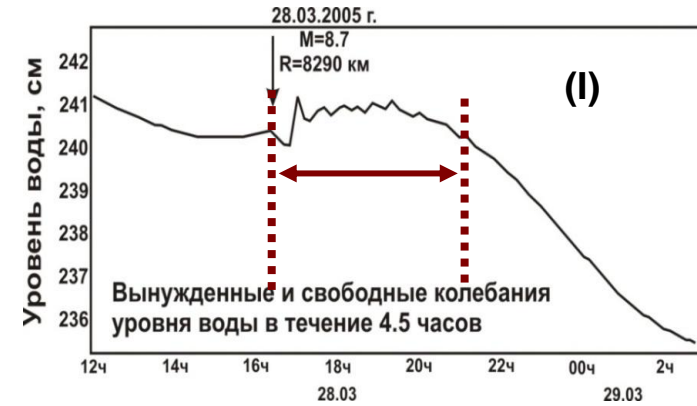


По 1-мин измерениям наблюдался скачок повышения давления воды с амплитудой $\Delta h = 3.2$ см в течение 1-мин интервала времени, включающего вступление сейсмических волн на с/ст. PET. Полученная оценка объемной косейсмической деформации $D_1 \approx -20 \cdot 10^{-9}$ значительно превышает теоретическую оценку $D_2 = -2.5 \cdot 10^{-9}$ по [Okada, 1985], но согласуется по характеру деформации (сжатие).

Такое отличие величины косейсмической деформации по равномерным данным от теоретической оценки, по-видимому, является следствием сильной зашумленности амплитуды косейсмического скачка осцилляциями давления при вступлении S-волн.

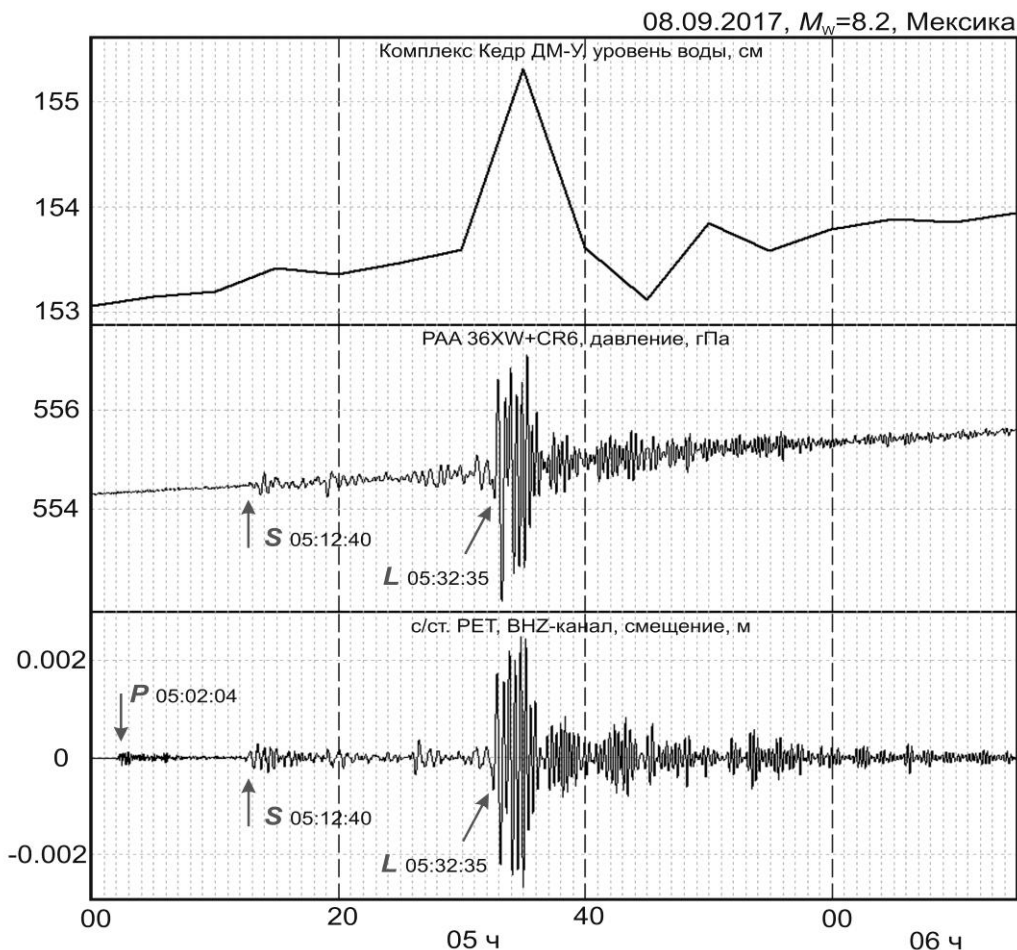
Типизация ГГСВ с учетом их морфологических особенностей - формы, амплитуды, продолжительности, по данным 1997-2018 гг., скв. Ю3-5

Типы ГГСВ	Характеристика ГГСВ	Механизмы формирования ГГСВ
I	Колебания уровня воды (water level transient dynamic oscillations)	Колебания давления подземных вод и столба воды в скважине при прохождении сейсмических волн
II	Колебания с наложением кратковременного повышения уровня воды (oscillations with transient level rise)	Колебания давления подземных вод и столба воды в скважине с наложением эффекта импульсного повышения давления вблизи ствола скважины
III	Кратковременные повышения уровня воды (transient level rise)	Импульсное повышение давления в области водовмещающих пород непосредственно примыкающей к стволу скважины
IV	Длительные (месяцы) понижения уровня воды (long water level lowering)	Падение давления в водовмещающих породах вследствие роста их проницаемости при интенсивных сейсмических сотрясениях ($I_{MSK-64}=5-6$ баллов)



Сильные телесейсмические землетрясения 2017-2018 гг.

Землетрясение 9 сентября 2017 г. ($M_w = 8.2$, $d_e = 7400$ км) в районе Мексики



Вариации уровня воды с периодичностью измерений 5 мин (Кедр ДМ) и давления подземных вод на глубине 5.6 м с частотой регистрации 10 Гц (датчик РАА 36XW) в скв. ЮЗ-5 при землетрясении 9 сентября 2017 г., $M_w = 8.2$, Мексика в сопоставлении с записью смещений на канале BHZ, с/ст. PET, датчик STS-1, 20 Гц.

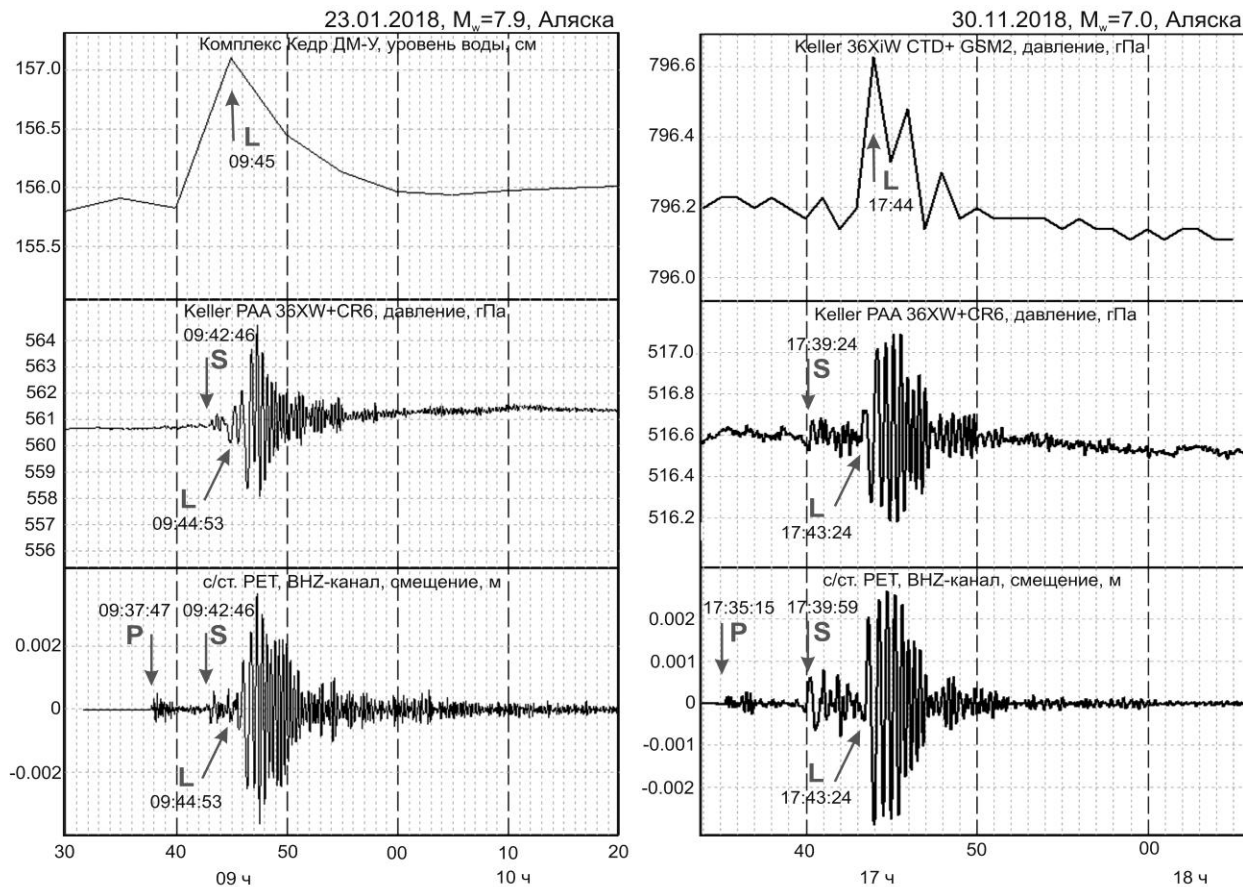
Продолжительность колебаний давления (датчик РАА 36XW) составляла 1.5 ч при максимальной амплитуде 3 гПа. **ГГСВ I типа** (вынужденные и свободные колебания)

По данным 5-минутных измерений уровня воды (Кедр ДМ) также диагностируется наличие **ГГСВ I типа** продолжительностью не менее одного часа с максимальной амплитудой в 2 см, что в 1.5 раза меньше, по сравнению с зарегистрированными вариациями давления воды.

Сопоставление высокочастотных записей с данными регистрации уровня воды аппаратурой Кедр ДМ показывает, что в случае землетрясения Мексика выделение типа вариаций по 5-мин данным было правильным – **тип I**

Сильные телесеismicические землетрясения 2017-2018 гг.

Землетрясения на Аляске: 23 января 2018 г. ($M_w = 7.9$, $d_e = 3440$ км) и 30 ноября 2018 г. ($M_w = 7.0$, $d_e = 3250$ км)



Приведенные примеры демонстрируют возможность выделения по данным 5-мин регистрации уровня воды ГГСВ I типа (вынужденные и свободные колебания) и II типа (колебания с кратковременным остаточным повышением) и получать приблизительные оценки их амплитуд, продолжительности и характера вариаций.

Вариации уровня и давления подземных вод в скв. ЮЗ-5 при прохождении сейсмических волн при землетрясениях 23 января 2018 г., $M_w = 7.9$ и 30 ноября 2018 г., $M_w = 7.0$ в сопоставлении с записями смещений на канале ВНЗ на с/ст. РЕТ (датчик STS-1, 20 Гц).

Заключение

Продемонстрированы первые результаты очередного этапа модернизации системы гидрогеодинамических наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН:

- дано детальное описание высокочастотных эффектов в изменениях уровня (давления) подземной воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясениях 2017-2018 гг. в сравнении с данными, полученными ранее используемой системой наблюдений Кедр ДМ;
- получено удовлетворительное соответствие данных, зарегистрированных различными комплектами оборудования, что позволяет рассматривать многолетний ряд наблюдений в качестве непрерывного и однородного в диапазоне частот < 0.002 Гц.

Косейсмический скачок уровня воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудой $\Delta h = 3.8$ см при Ближне-Алеутском землетрясении 17 июля 2017 г., $M_w = 7.8$, эпицентральное расстояние $d_e = 750$ км, был зафиксирован впервые на таком удалении от скважины.

Понижение уровня в скважине Е-1 в 2012-2017 гг. (эффект ГП_2) было сопряжено с геодинамической обстановкой в области Камчатской островной дуги и ее сочленения с Алеутской островной дугой, предшествующей и сопровождающей усиление сейсмической активности 2013-2017 гг., в т.ч. возникновению нескольких сильных землетрясений (с M порядка 7-8), включая Ближне-Алеутское землетрясение 17 июля 2017 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00337.

Спасибо за внимание!