

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ
ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА,
ВЫЗВАННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ
28.02.2013 г., M=6.8**

*С.В. Болдина, Г.Н. Копылова
boldina@emsd.ru*

Введение

Достоверная диагностика изменений уровня воды, вызванных процессами подготовки и реализации сильных землетрясений, является основной целью прецизионных уровнемерных наблюдений, проводимых КФ ГС РАН.

Такие изменения уровня воды называются *гидрогеосейсмическими вариациями*. Описание различных типов гидрогеосейсмических вариаций - *гидрогеодинамических предвестников, косейсмических скачков и постсейсмических изменений*, зарегистрированных в скважинах Камчатки в связи с местными и удаленными сильнейшими землетрясениями, приводится в [Копылова, 2006; Болдина, Копылова, 2008; Копылова и др., 2010, 2012 и др.].

Данные о гидрогеосейсмических вариациях с указанием их форм, амплитуд и продолжительностей позволяет изучать гидрогеодинамические процессы в системах «скважина – водовмещающая порода» под воздействием факторов сейсмичности.

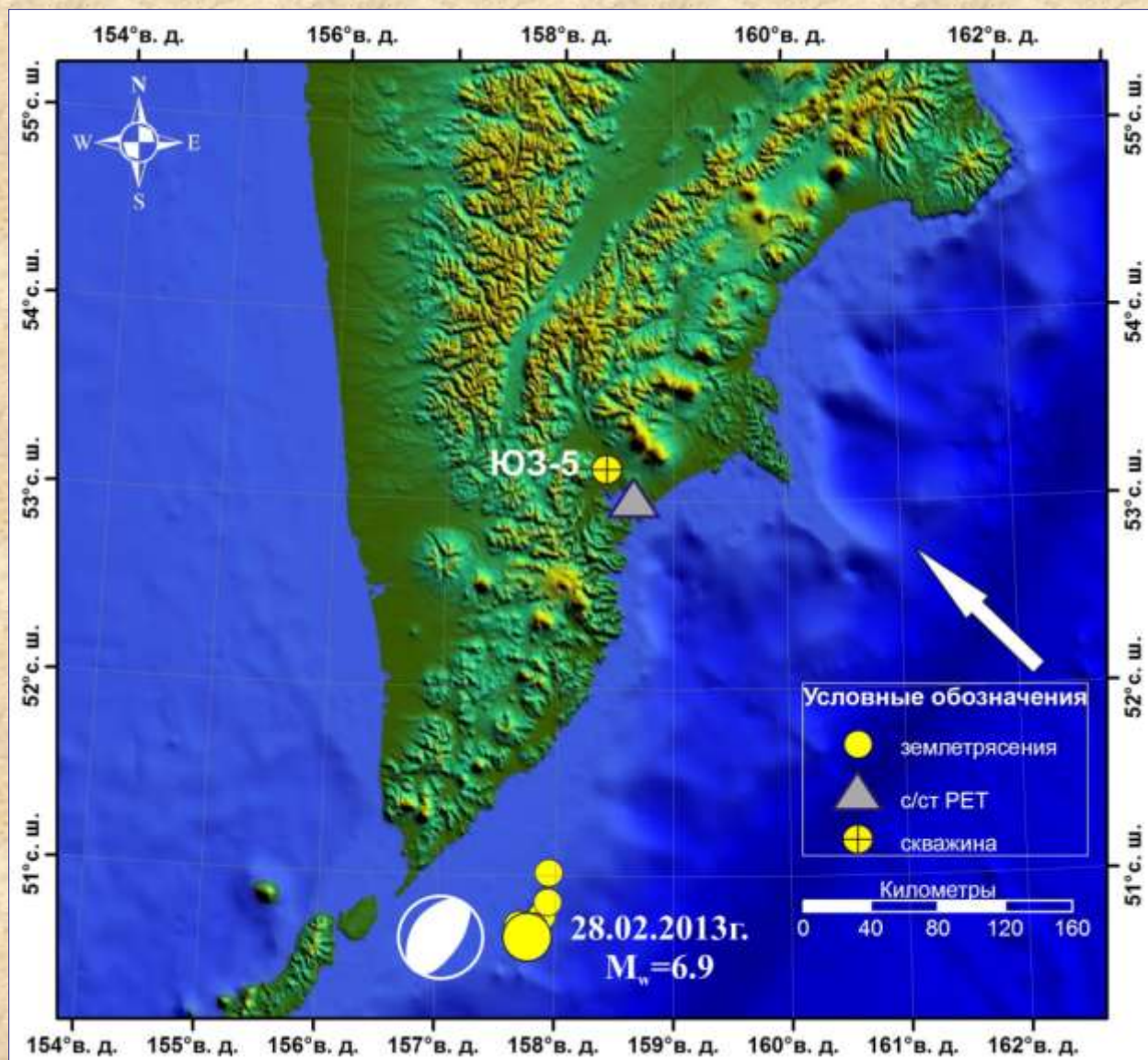
Математическое моделирование гидрогеосейсмических вариаций с учетом фильтрационных и упругих параметров водовмещающих пород, технического строения скважины, эффекта инерционности водообмена между скважиной и водовмещающей породой является одним из эффективных способов описания таких процессов [Болдина, Копылова, 2008; Копылова, 2010; Roeloffs, 1998;].

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 28.02.2013 г., $M=6.8$

28 февраля 2013 г. на расстоянии около 260 км от наблюдательной скважины ЮЗ-5 произошло землетрясение с магнитудой $M_w=6.8$ (определение NEIS (USGS)).

Вступление сейсмических волн было зарегистрировано на ближайшей к скважине сейсмостанции Петропавловск (с/ст РЕТ) в 14:07. Интенсивность сотрясений в районе скважины составляла 4-5 баллов по шкале MSK-64 [Чебров и др., 2013].

Схема расположения скважины ЮЗ-5, с/ст. Петропавловск (РЕТ), эпицентров землетрясения 28 февраля 2013 г. и его сильнейших афтершоков. Показаны также механизм очага землетрясения и направление движения Тихоокеанской океанической плиты (стрелка).



ХАРАКТЕРИСТИКА НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ЮЗ-5

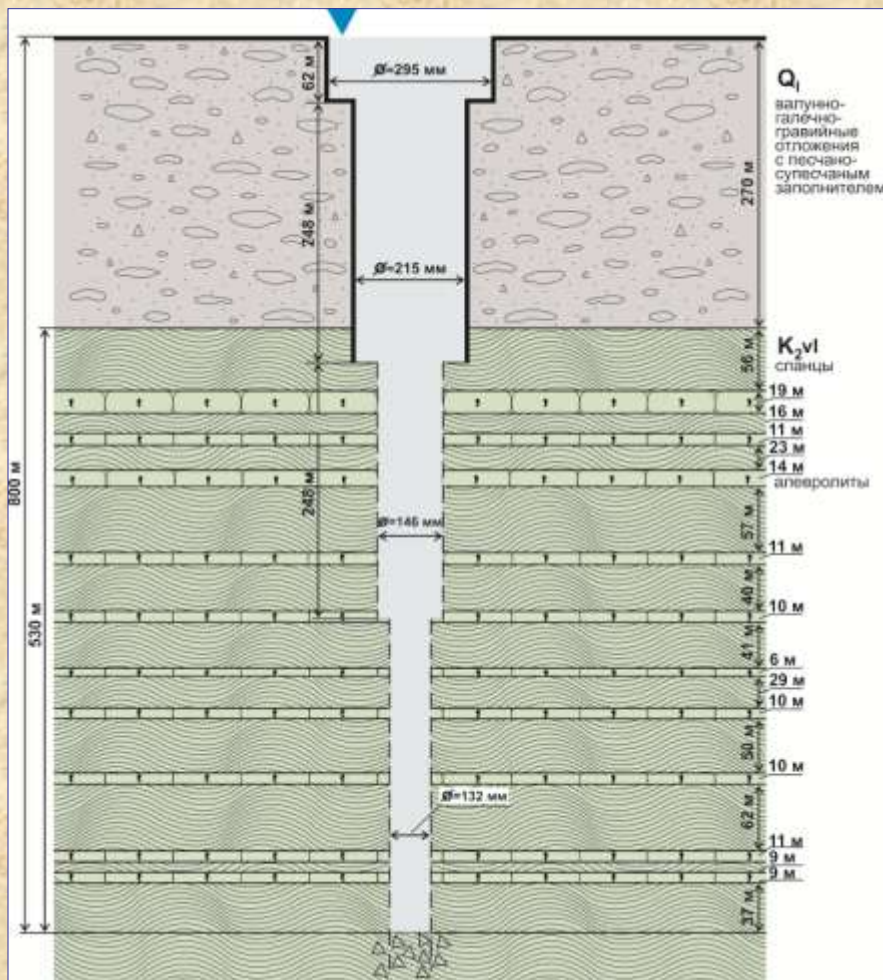


Схема строения скважины ЮЗ-5

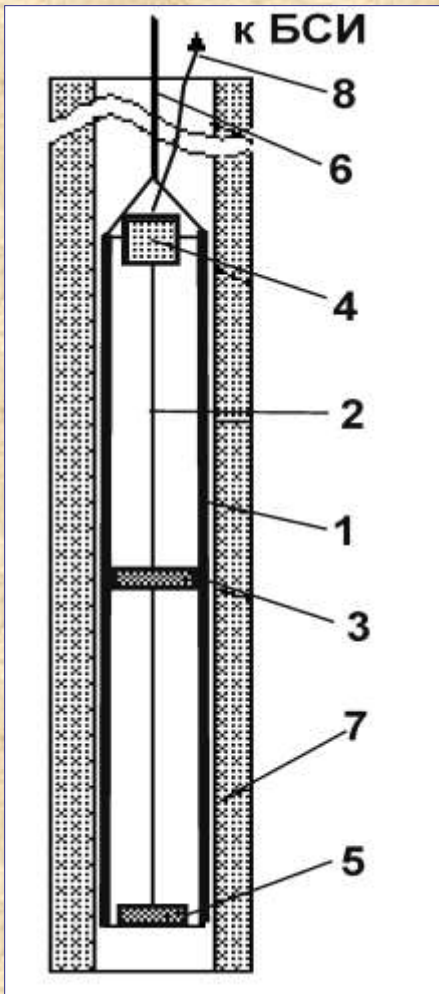
КФ ГС РАН проводит наблюдения на скважине ЮЗ-5 с 1997 г. <http://emsd.ru/lgi/places>

Скважина ЮЗ-5 (53.17° с.ш., 158.41° в.д.) вскрывает сланцы и алевролиты позднемелового возраста. В интервале глубин 310-800 м в водовмещающих породах содержатся холодные пресные подземные воды без газа. Уровень находится на глубине 1 м ниже поверхности земли. Величина водопроницаемости $T=7.8 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Таблица. Величины упругих параметров водовмещающих пород

Скважина	Барометрическая эффективность E_b , см/гПа	Приливная чувствительность A_p , 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 /с	Коэффициент фильтрации, k , м/с
ЮЗ-5	0.39	0.161	15.2	0.39	0.67	21.4	0.15	21.4·10 ⁻⁵	9·10 ⁻⁵	9·10 ⁻⁷

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КЕДР ДМ-У



На скважине установлен измерительный комплекс Кедр ДМ (ООО «Полином», г. Хабаровск) с телеметрической передачей данных по каналам сотовой связи.

В состав комплекса входит высокочувствительный ультразвуковой датчик уровня воды (скважинный уровнемер), глубинный зонд с датчиками температуры и электропроводности воды. В регистратор БСИ встроены датчики температуры воздуха и атмосферного давления [Калинов и др., 2013].

На рисунке представлен скважинный уровнемер, который состоит из: корпуса, представленного защитной трубой диаметром 51 мм и длиной 3 м (1); вертикального стержня-звукопровода, натянутого в центре трубы (2); поплавка-излучателя УЗИ, коаксиально охватывающего стержень и свободно перемещающегося вдоль него (3); блока питания, синхронизации и приема УЗИ, укрепленного на верхнем конце стержня (4); эталонного излучателя УЗИ, укрепленного на нижнем конце стержня (5). Уровнемер опускается на специальном тросе (6) в скважину (7). На поверхности земли у устья скважины расположен блок сбора информации БСИ (логгер), связь с которым осуществляется по кабелю (8).

Чувствительность измерений уровня воды с компенсированными баровариациями – 0.1 см

Интервал регистрации параметров – 5 минут

Передача данных по каналам сотовой связи – 1 раз в час.

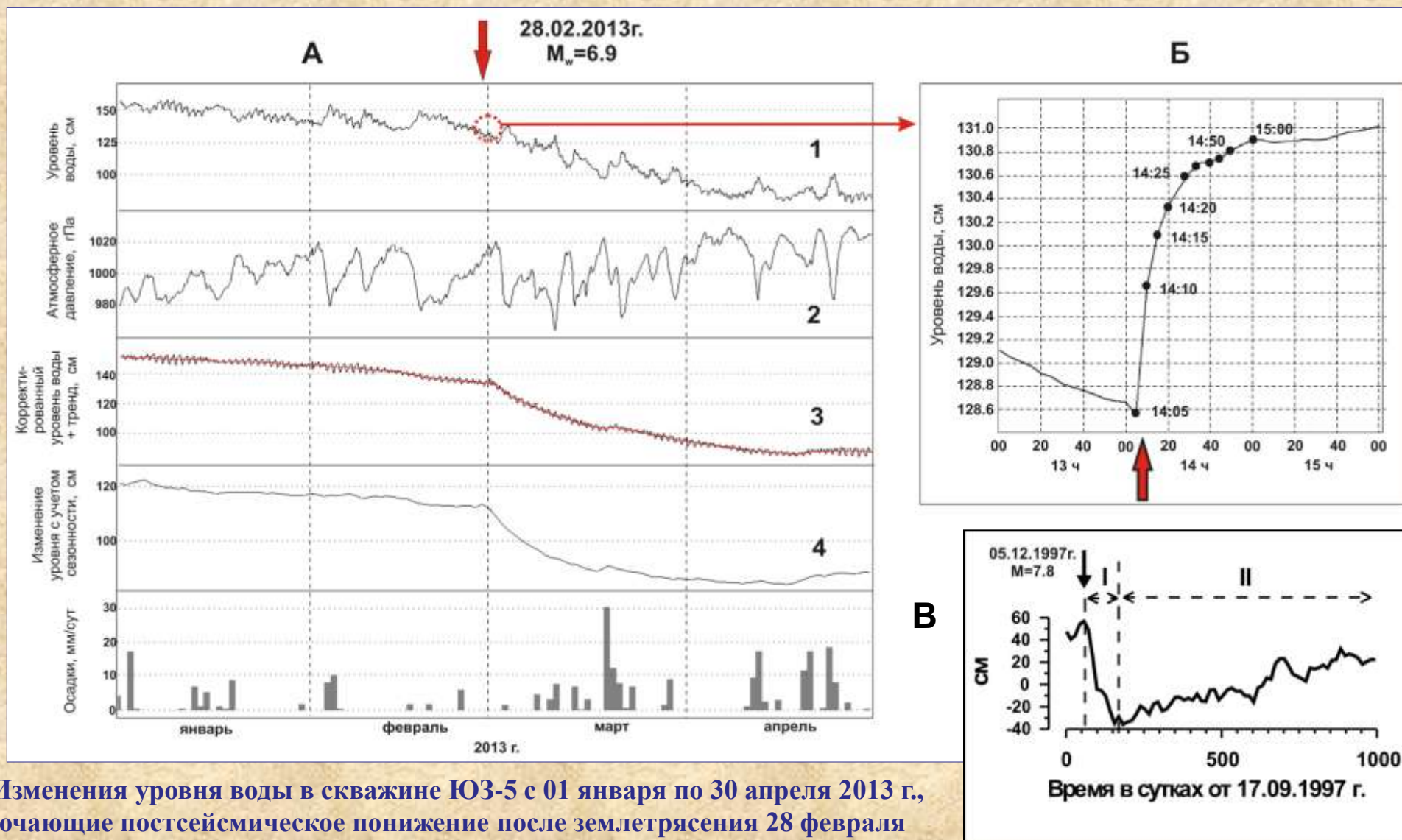
Обработка данных производится ежедневно.

Данные наблюдений представляются по адресу:

<http://www.emsd.ru/lgi/observations>

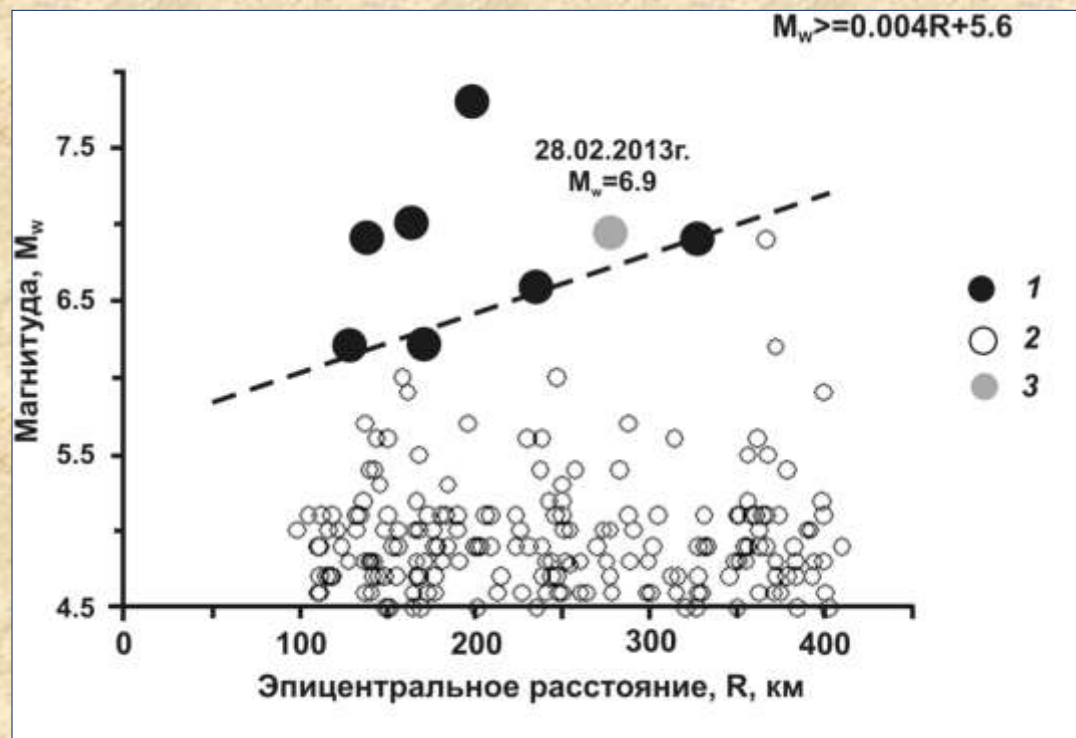
Скважинный уровнемер

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ, СКВ. ЮЗ-5, В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28 ФЕВРАЛЯ 2013 Г.



(А) Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 01 января по 30 апреля 2013 г., включающие постсейсмическое понижение после землетрясения 28 февраля 2013 г.; (Б) повышение уровня воды в течение 50 минут после вступления сейсмических волн по данным 5-минутной регистрации; (В) Понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M=7.8$.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ, СКВ. ЮЗ-5, В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28 ФЕВРАЛЯ 2013 Г.



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

1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическим скачками уровня воды;

2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня не были зарегистрированы [Копылова и др. 2010];

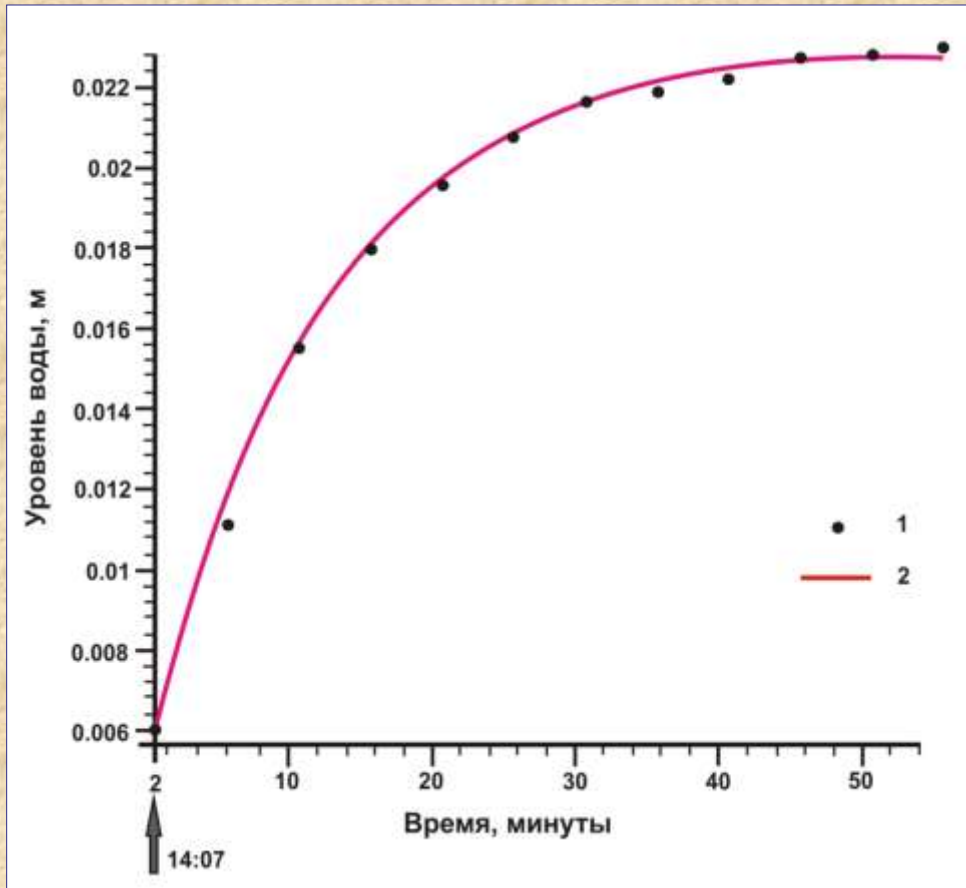
3 – землетрясение 28 февраля 2013 г.

Табл. Параметры очага землетрясения 28.02.2013 г. (по данным каталога СМТ (<http://www.globalcmt.org/>))

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центра			Плоскости подвижки		Угол Подвижки, λ_s , градусы	Скалярный сейсмический момент M_0 , Н·м·10 ²⁰
			град. с. ш.	град. в. д.	Н, км	азимут Простираения ϕ_s , градусы	угол падения δ , градусы		
28.02.2013	14:05:59	6.8	50.83	157.9	45.1	212/36	32/58	86/92	0.211

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

Кратковременное повышение уровня воды после землетрясения



Для описания кратковременного постсейсмического повышения уровня воды использовалась затухающая экспоненциальная функция, которая ранее применялась при анализе вариаций в скважине BV (США, Калифорния) в результате землетрясения Ландерс 28 июня 1992 г., $M_w = 7.3$ [Roeloffs, 1998]:

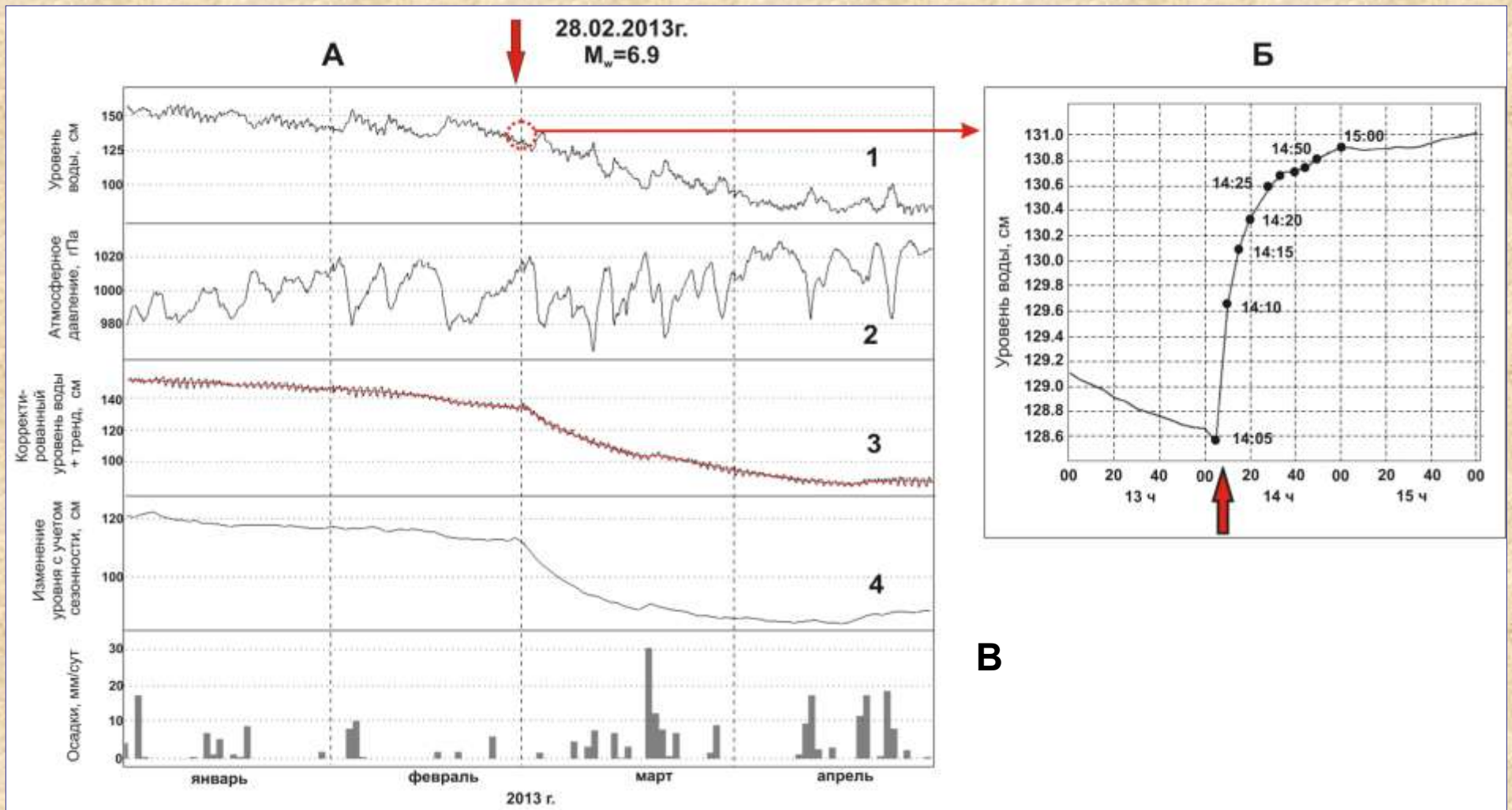
$$u(t) = u_0[1 - \exp(-t/t_r)],$$

где u_0 — максимальная амплитуда повышения уровня воды, t — время; t_r — константа (параметр времени релаксации давления в системе «скважина — водовмещающая порода»).

Расчетное повышение уровня воды в течение 50 минут хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при величине амплитуды косейсмического скачка $\Delta h = 0.6$ см, $u_0 = 1.7$ см и при величине константы $t_r = 12$ мин. Амплитуда Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 2.3 см, складывающейся из u_0 и Δh , т. е. с учетом условия $u_0 + \Delta h = 2.3$ см.

Результаты моделирования повышения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение 50 минут после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля 2013 г. (показано стрелкой): 1 — 5-минутные данные наблюдений; 2 — расчетное повышение уровня воды.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ



(А) Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 01 января по 30 апреля 2013 г., включающие постсейсмическое понижение после землетрясения 28 февраля 2013 г.; (Б) 50-минутное повышение уровня воды после вступления сейсмических волн по данным 5-минутной регистрации; (В) Понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M=7.8$.

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Для оценки *величины объемной косейсмической деформации по уровнемерным данным* использовалась формула [Копылова, 2006; Болдина, Копылова, 2008; Копылова и др., 2010]:

$$D = -\Delta h / A_v, \quad D = -3.7 \cdot 10^{-9}$$

где D – объемная деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию водовмещающих пород, Δh – амплитуда косейсмического изменения уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует понижению уровня воды, A_v – приливная чувствительность уровня воды по отношению к объемной деформации, см/ 10^{-9}

Использовались:

- величина приливной чувствительности уровня воды по отношению к объемной приливной деформации $A_v = 0.161$ см/ 10^{-9} , полученная по результатам приливного анализа вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 [Болдина, Копылова, 2008; Копылова, 2006; Копылова и др., 2010];
 - величина $\Delta h = 0.6$ см, полученная по результатам моделирования кратковременного повышения уровня воды
- По направлению изменения уровня воды (повышение) характер деформации водовмещающих пород соответствует *объемному сжатию*.

Теоретическая оценка величины косейсмической деформации (ε) выполнялась на основе решения уравнения для двойной пары сил в бесконечной однородной среде [Аки, Ричардс, 1983; Болдина, Копылова, 2008] по формуле:

$$\varepsilon = -\frac{2M_0}{\pi \rho c_p^2 r^3} \sum_{p,q=1}^3 M_{pq} \gamma_p \gamma_q \quad \varepsilon = 2.0 \cdot 10^{-9}$$

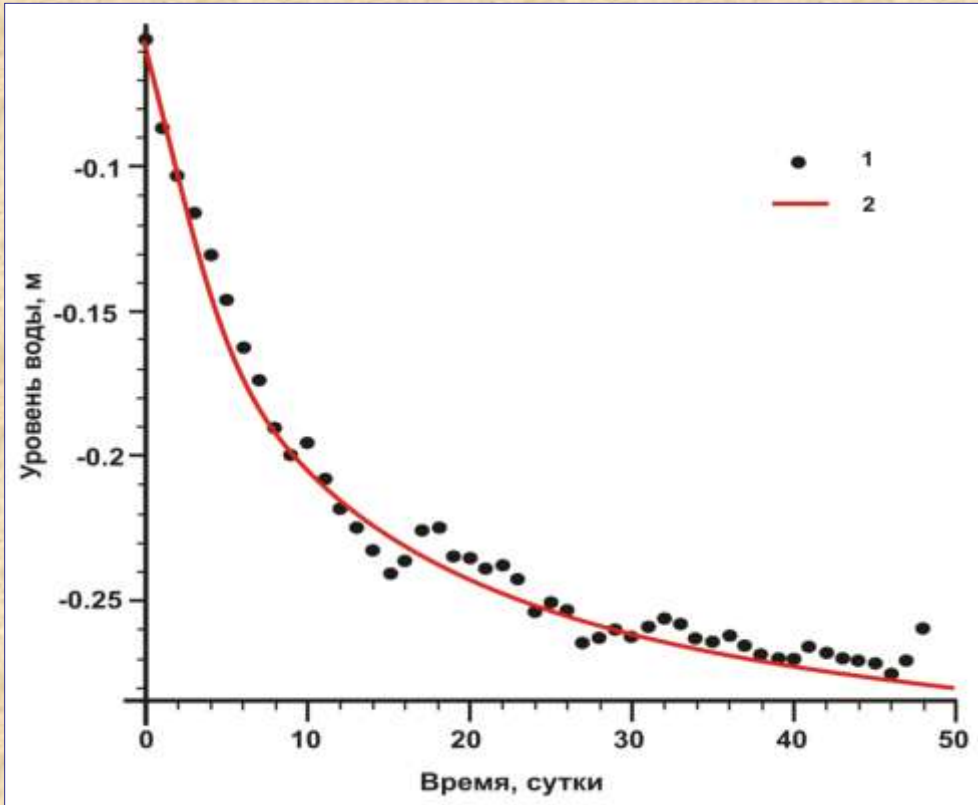
где M_0 – скалярный сейсмический момент, ρ – плотность среды, c_p – скорость Р-волн, r – гипоцентральное расстояние, M_{pq} ($p, q = 1, 2, 3$) – компоненты единичного тензора сейсмического момента (механизм), γ_p ($p = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы луча.

Расчет косейсмической объемной деформации ε проводился с использованием величин $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_p = 6.15 \cdot 10^3$ м/с, $r = 260 \cdot 10^3$ м (расстояние от центра до скважины), $M_0 = 0.211 \cdot 10^{20}$ Н·м и параметров СМТ.

Некоторое различие в определении амплитуды косейсмической деформации в районе скважины ($D = -3.7 \cdot 10^{-9}$ и $\varepsilon = 2.0 \cdot 10^{-9}$) связано с ошибками оценивания объемных деформаций, присущих обоим используемым методам [Копылова и др., 2010].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

Длительное понижение уровня воды после землетрясения



Результаты моделирования понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после землетрясения 28.02.2013 г.:

1 – среднесуточные данные наблюдений с компенсированными барометрическими и сезонными вариациями; 2 – расчетное понижение уровня воды.

Понижение уровня с 28 февраля по 15 апреля 2013 г. отражает понижение и восстановление напора в контролируемом скважиной водоносном горизонте и может описываться математической моделью удаленного точечного источника падения напора [Карслоу, Егер, 1964; Crank, 1975; Болдина, Копылова, 2008]:

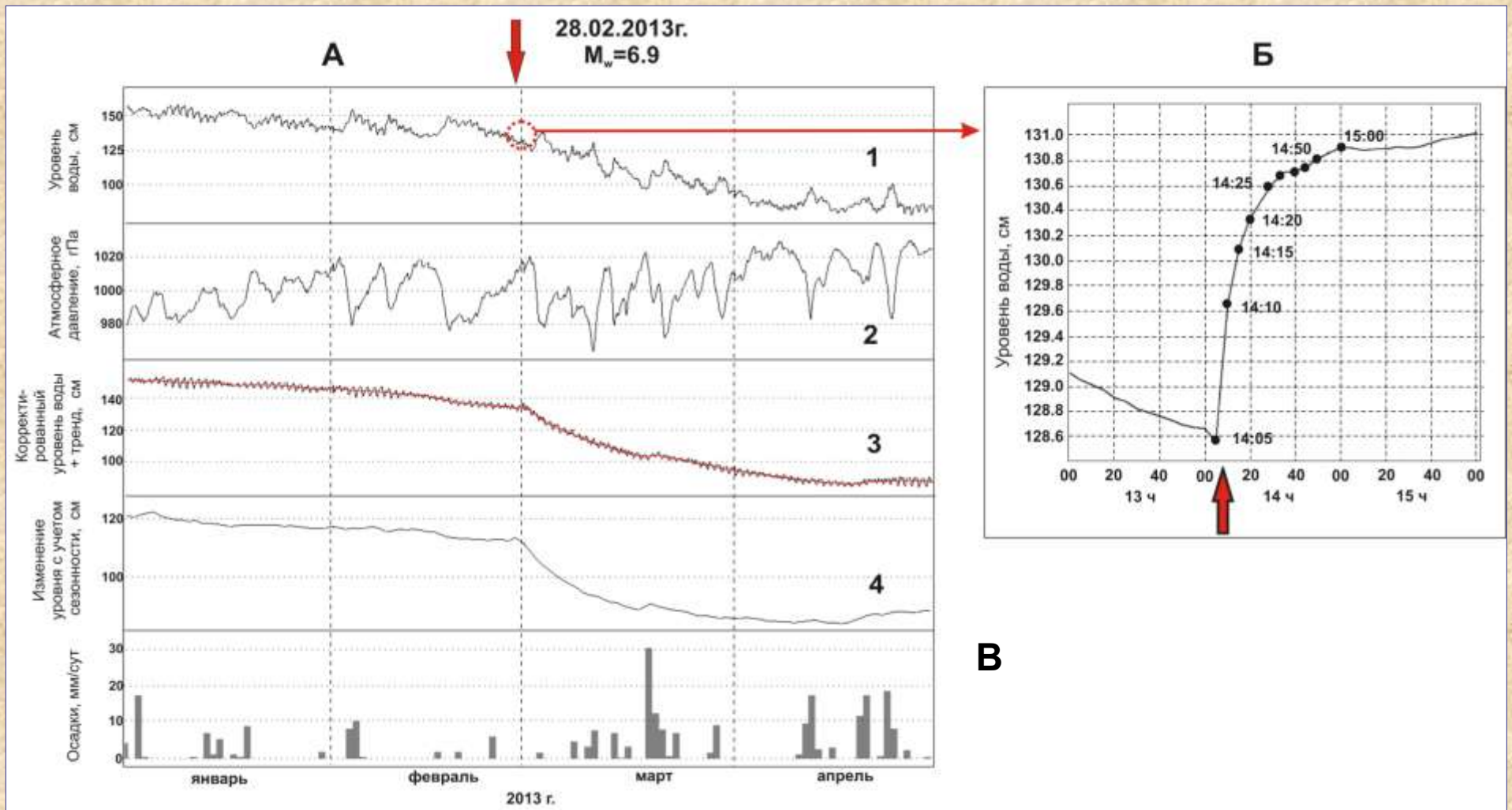
$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}\left(R / \sqrt{4at}\right)$$

где x – уровень воды в скважине, x_0 – начальный уровень воды в скважине, $\Delta h = \Delta p / \rho g$ – изменение напора при изменении порового давления Δp , ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, R – расстояние от источника падения напора в горизонте до скважины, a – пьезопроводность, t – время.

Результаты моделирования показывают удовлетворительное соответствие расчетной зависимости с постсейсмическим понижением уровня воды при следующих параметрах:

- амплитуда понижения уровня воды $\Delta h = 0.28$ м,
- пьезопроводность $a = 0.24$ м²/с,
- расстояние от источника падения напора до скважины $R = 450$ м.

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ



(А) Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 01 января по 30 апреля 2013 г., включающие постсейсмическое понижение после землетрясения 28 февраля 2013 г.; (Б) 50-минутное повышение уровня воды после вступления сейсмических волн по данным 5-минутной регистрации; (В) Понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M=7.8$.

Заключение

Землетрясение 28 февраля 2013 г., $M_w = 6.8$ сопровождалось гидрогеосейсмическими вариациями уровня воды в скв. ЮЗ-5, имеющими, в основном, ко- и постсейсмический характер. С использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У зарегистрировано кратковременное повышение уровня, сменившееся длительным понижением. Этот факт расширяет эмпирическую базу наблюдений за различными типами гидрогеосейсмических вариаций уровня воды.

Кратковременное повышение уровня могло быть обусловлено наложением эффектов косейсмической деформации сжатия водовмещающих пород и импульса повышения порового давления вблизи скважины.

Оценена амплитуда косейсмического скачка уровня воды (0.6 см), получено соответствие оценок косейсмической деформации по уровнемерным данным и по теоретической модели ($D = -3.7 \cdot 10^{-9}$ и $\varepsilon = 2.0 \cdot 10^{-9}$). Такое соответствие подтверждает высокую деформометрическую чувствительность уровня воды в скв. ЮЗ-5.

Длительное постсейсмическое понижение уровня могло быть вызвано падением напора в водоносном горизонте вследствие локального повышения проницаемости и улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях.

Спасибо за внимание!