

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

# **СКВАЖИННЫЕ УРОВНЕМЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В СИСТЕМЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КАМЧАТКЕ**

**Копылова Г.Н., Болдина С.В.**

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

***Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 18-05-00337 и 18-05-00133***

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

## **ВВЕДЕНИЕ**

В скважинах КФ ФИЦ ЕГС РАН, Камчатка, обнаружены разнообразные эффекты в изменениях уровня (давления) подземных вод при землетрясениях, в т. ч.

- **гидрогеодинамические предвестники землетрясений (ГП);**
- **косейсмические скачки давления (КС)** при местных сильных землетрясениях ;
- **эффекты вибрационного воздействия сейсмических волн от местных и сильнейших телесейсмических событий (гидрогеосейсмические вариации – ГГСВ, всего четыре типа).**

### **Практическое значение таких эффектов для геофизического мониторинга:**

- **ГП** используются в системе сейсмического прогнозирования на Камчатке;
- по амплитудам **КС** оценивается величина статической объемной деформации в районе скважины при образовании разрывов в очагах землетрясений, по направлению **КС** – характер деформации (объемное расширение или сжатие);
- по типу **ГГСВ** оцениваются характер гидрогеодинамических процессов в системе «скважина - водовмещающая порода» при воздействии сейсмических волн.

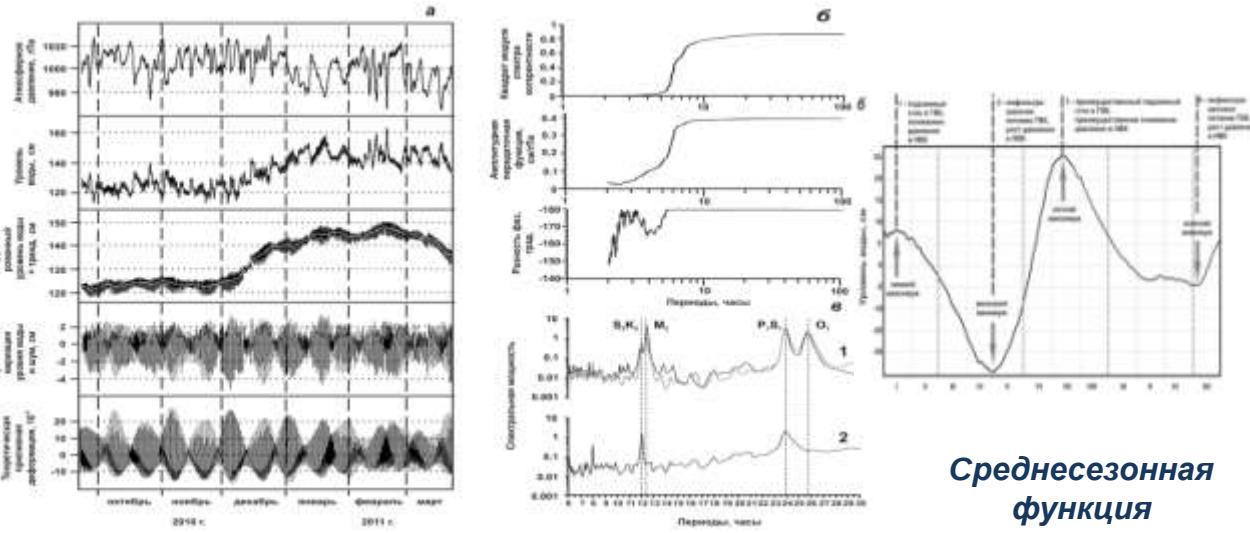
### **Все результаты опубликованы !**

**Задача дальнейших исследований:** развитие методов обработки и интерпретации уровнемерных данных с целью диагностики новых эффектов в изменениях уровня (давления) подземных вод при подготовке и реализации сильных землетрясений.

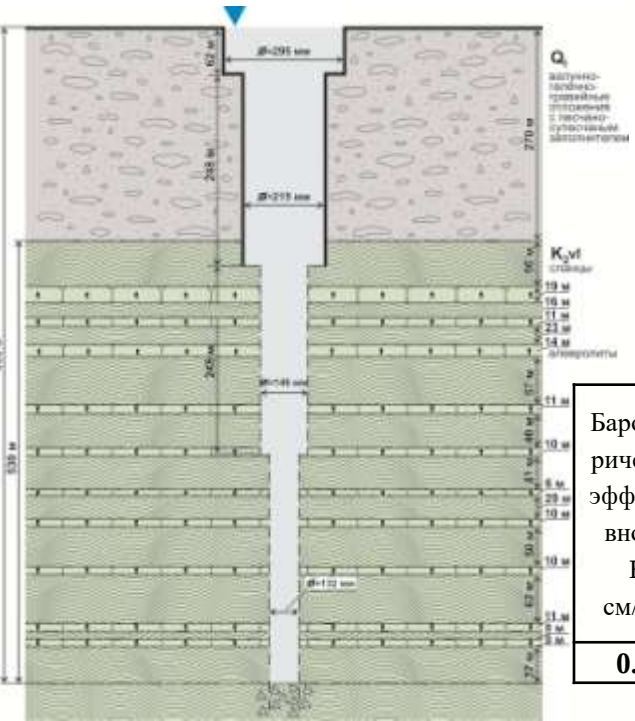
Схема расположения скв.ЮЗ-5



Характеристика уровнемерных данных  
(Болдина, Копылова, 2013; и др.)



Строение скв. ЮЗ-5



Данные наблюдений

Барометрический и приливной отклик уровня воды

Среднесезонная функция изменений уровня воды

Упругие и фильтрационные параметры водовмещающих пород (Копылова, Болдина, 2012)

| Барометрическая эффективность $E_b$<br>см/гПа | Приливная чувствительность $A_v$<br>м/10 <sup>-7</sup> | Сжимаемость $\beta$<br>Па <sup>-1</sup> ·10 <sup>-11</sup> | Модуль сдвига $G$<br>Па·10 <sup>10</sup> | Коэффициент Скемптона $B$ | Удельная упругая емкость $S_s$<br>м <sup>-1</sup> ·10 <sup>-7</sup> | Пористость $\phi$ | Водоотдача $S$        | Водопроницаемость, $T$ , м <sup>2</sup> /сут | Коэффициент фильтрации, $k=T/d$ , м/с | Пьезопроводность, $a=k/S_S$ м <sup>2</sup> /с |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0.39                                          | 0.161                                                  | 12.5                                                       | 1.34                                     | 0.67                      | 16.9                                                                | 0.11              | 16.9·10 <sup>-5</sup> | 7.8                                          | 9·10 <sup>-7</sup>                    | 0.53                                          |

# Измерительный комплекс Кедр ДМ (ООО «Полином», г. Хабаровск)

## 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<br>(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**

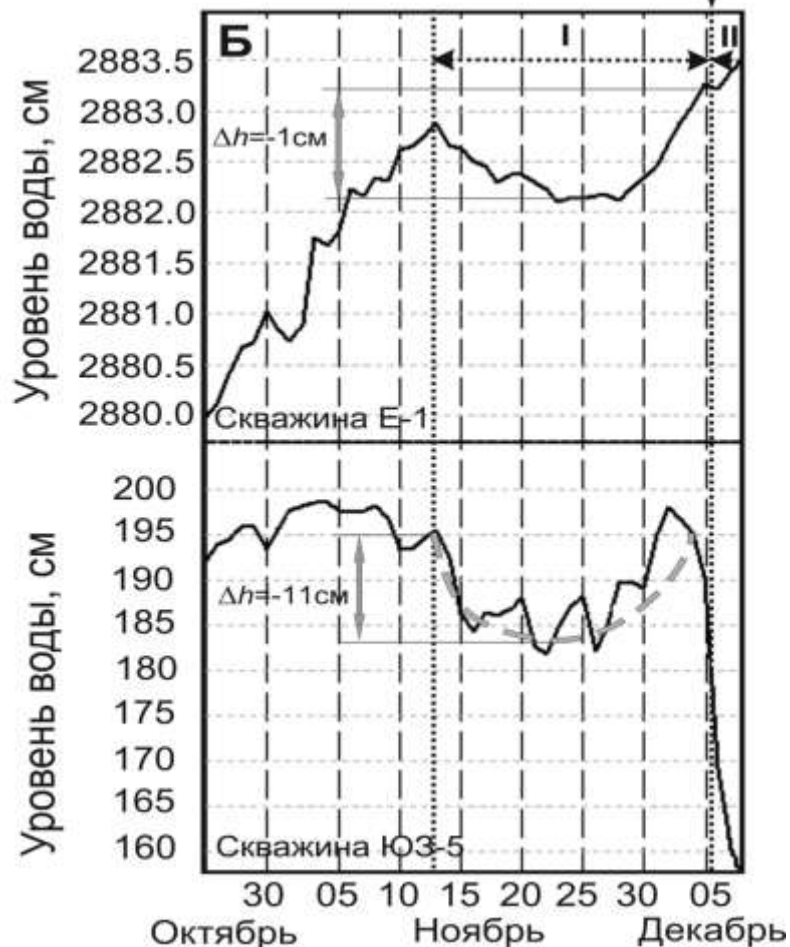
**Передача данных по каналам сотовой связи – 1 раз в час.**

**Обработка данных производится ежедневно.**

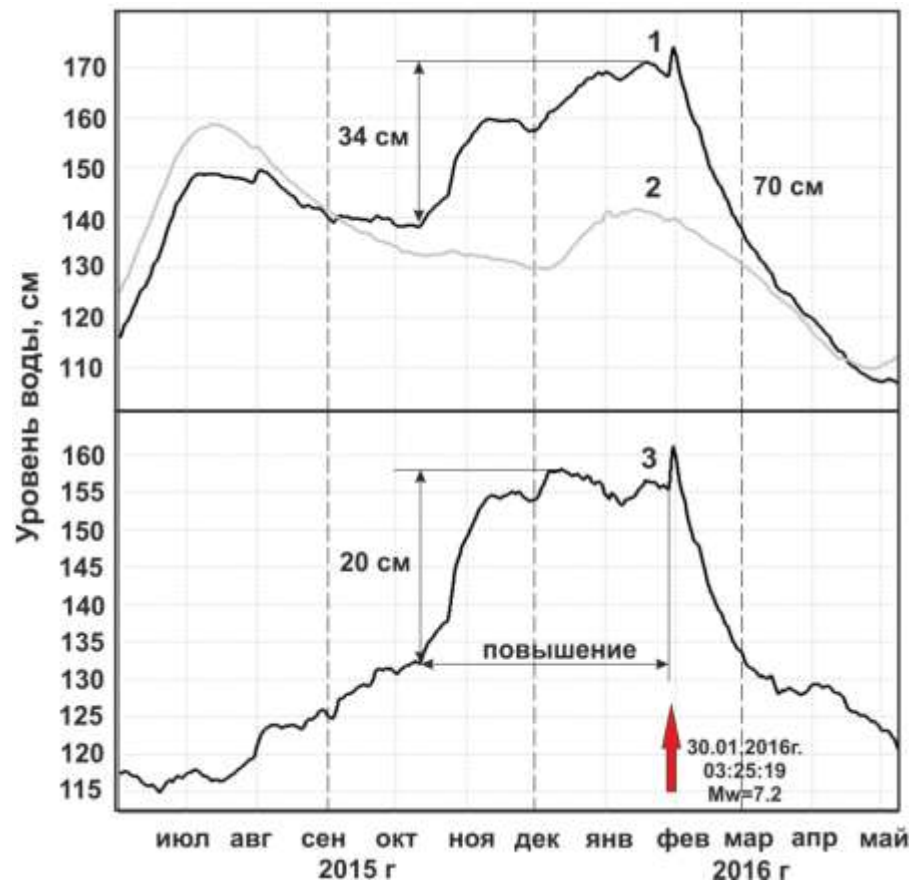


# Скважина ЮЗ-5: проявления ГП перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г., $M_w=7.8$ и Жупановским землетрясением 30.01.2016 г., $M_w=7.2$ .

Кроноцкое землетрясение,  
05.12.1997г.,  $M=7.8$ ,  $H=33$  км,  $d_e=200$ км,



Жупановское землетрясение,  
30.01.2016г.,  $M=7.2$ ,  $H=180$  км,  $d_e=80$ км,



**В докладе на примере скважины ЮЗ-5 представлены два новых метода обработки уровнемерных данных, которые расширяют возможности выделения аномалий гидрогеодинамического режима в связи с землетрясениями:**

**1 - статистический анализ 5-минутных данных регистрации уровня воды для выделения краткосрочных аномальных состояний временных рядов уровня воды.**

ISSN: 0131-6230, eISSN: 2312-6965, <https://doi.org/10.21455/si>,

[http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=25597](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=25597)

English translation: Seismic Instruments, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online),

<https://link.springer.com/journal/11990>

Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 1. С.5–28. <https://doi.org/10.21455/si2019.1-1>

*The metadata in English is presented at the end of the article!*

УДК 550.34: 556.33

PACS: 91.30.Px

**Статистический анализ прецизионных данных  
наблюдений за уровнем подземных вод  
в сейсмоактивном регионе  
(на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка)**

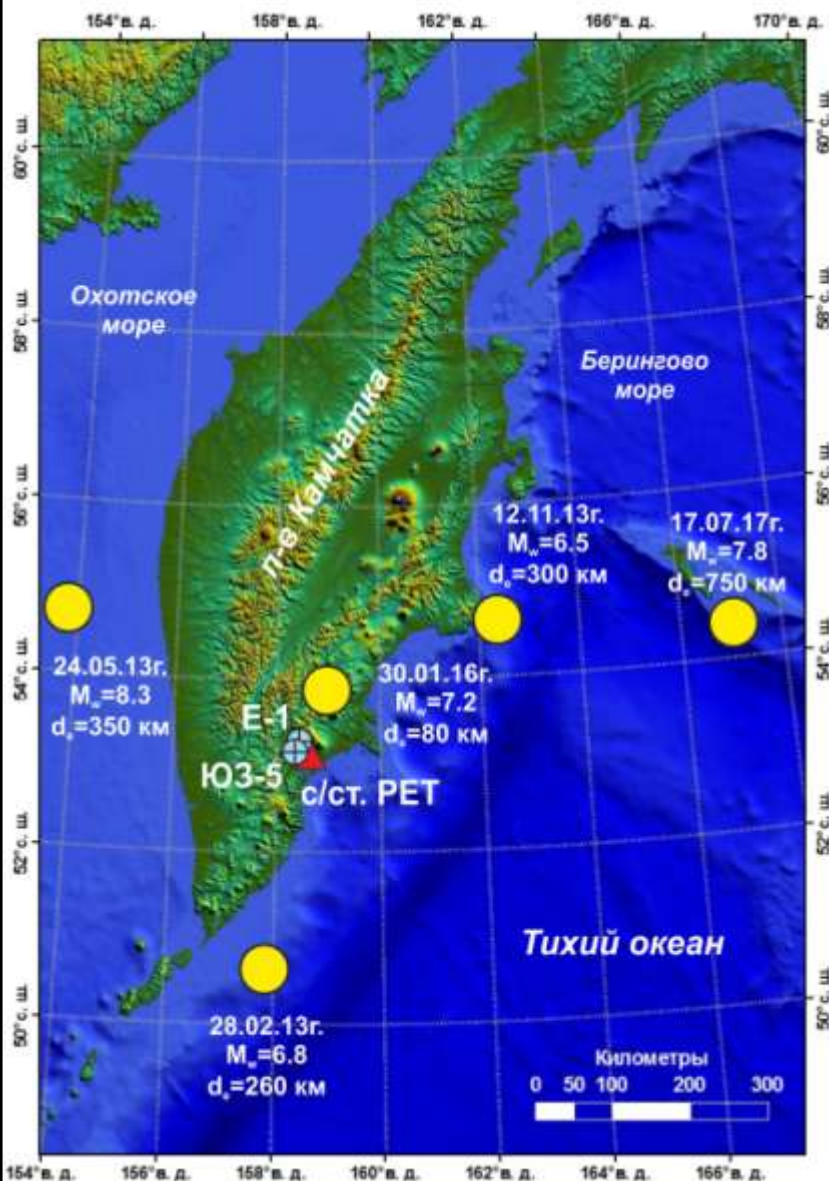
© 2019 г. Г.Н. Копылова<sup>1</sup>, А.А. Любушин<sup>2</sup>, С.В. Болдина<sup>1</sup>

*Автор алгоритма статистической  
обработки уровнемерных данных и  
программного обеспечения д. ф.-м. н.,  
гл. н.с. ИФЗ РАН А.А. Любушин.*

**Исходные данные:** временной ряд 5-минутных наблюдений уровня воды и атмосферного давления с 27.07.2012 г по 01.02.2018 г (2015 сут, 580605 5-минутных отсчетов).

**Данные примечательны высоким качеством**, а также тем, что в течение наблюдений произошли пять землетрясений с  $M_w = 6.5-8.3$  в Камчатской сейсмоактивной зоне и в западной части Алеутской сейсмоактивной зоны на эпицентральных расстояниях  $d_e = 80-700$  км.

# Схема расположения скв. ЮЗ-5 и эпицентров сильных землетрясений 2013-2017гг

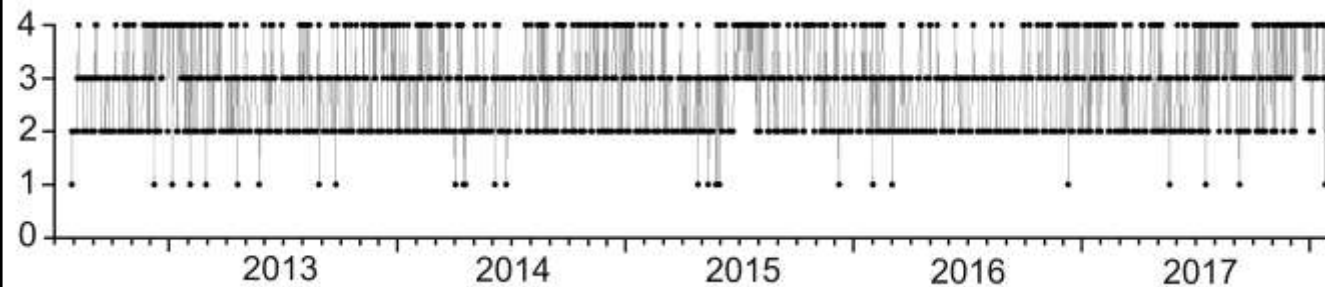


Параметры сильных землетрясений по данным  
КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/>),  
Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>),  
NEIS (US GS) (<https://earthquake.usgs.gov>)

| №<br>п/п | Гипоцентр                                            |                |                     |        |             | Энергетические<br>параметры<br>класс/<br>магнитуда |       | Эпицентр-<br>альное<br>расстояние<br>$d_e$ , км/<br>интенсив-<br>ность<br>сотрясе-<br>ний по<br>шкале<br><i>MSK-64</i> |
|----------|------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------|-------------|----------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | дата<br>дд.мм.гггг<br>название<br>земле-<br>трясения | время<br>чч:мм | координаты,<br>град |        | $H$ ,<br>км | $K_S$                                              | $M_w$ |                                                                                                                        |
|          |                                                      |                | с.ш.                | в.д.   |             |                                                    |       |                                                                                                                        |
| 1        | 28.02.2013                                           | 14:06          | 50.67               | 157.77 | 61          | 15.2                                               | 6.8   | 260/4-5                                                                                                                |
| 2        | 24.05.2013                                           | 05:45          | 54.76               | 153.79 | 630         | 17.0                                               | 8.3   | 348/4                                                                                                                  |
| 3        | 12.11.2013                                           | 07:04          | 54.63               | 162.45 | 72          | 15.0                                               | 6.5   | 300/3-4                                                                                                                |
| 4        | 30.01.2016                                           | 03:25          | 53.85               | 159.04 | 180         | 15.7                                               | 7.2   | 80/5                                                                                                                   |
| 5        | 17.07.2017                                           | 23:34          | 54.35               | 168.90 | 7           | 16.1                                               | 7.8   | 700/2-3                                                                                                                |

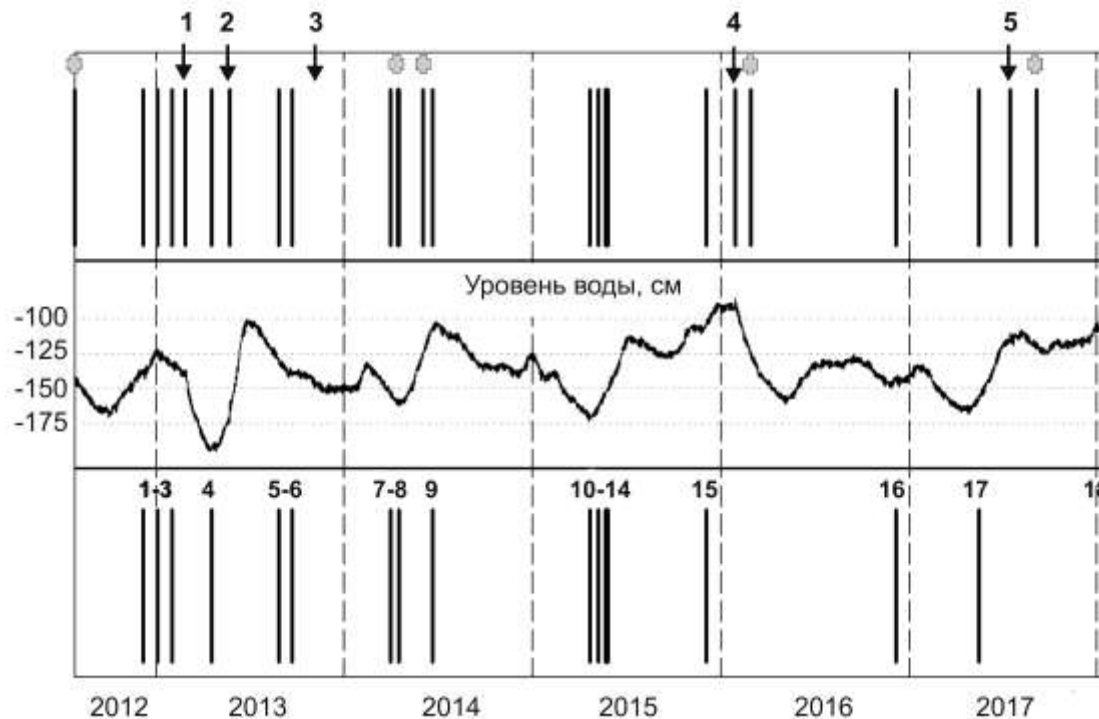
Красным цветом выделены землетрясения, перед которыми проявлялись ГП в изменениях уровня воды в скв. Е-1, диагностированные в режиме реального времени. С их использованием были успешно спрогнозированы землетрясения 28.02.2013 г. и 30.01.2016г. с заблаговременностью 21 и 9 суток (по оценкам автора и КФ РЭС).

## Кластерный анализ ортогональных общих факторов для временного окна 1 сутки



Кластеры 2-4 проявляются с суммарной вероятностью 0.99 (фоновое состояние);  
**Кластер 1 – вероятность 0.01 (аномальное состояние).**

Последовательность переходов между четырьмя кластерами статистических свойств временного ряда уровня воды (по вертикальной оси показаны номера кластеров 1-4).



**а** Распределение во времени кластера 1 (а) в сопоставлении с рядом вариаций уровня воды (б), сильными землетрясениями (показаны стрелками):  
**б** 1 – 28.02.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км;  
 2 – 24.05.2013 г.,  $M_w = 8.3$ ,  $d_e = 350$  км;  
 3 – 12.11.2013 г.,  $M_w = 6.5$ ,  $d_e = 300$  км;  
 4 – 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км;  
 5 – 17.07.2017 г.,  $M_w = 7.8$ ,  $d_e = 700$  км)  
**в** и датами работ на скважине (показаны крестами).

В 90% случаев известных возмущений гидродинамического режима скважины (9 из 10) проявлялся кластер 1. В 18 случаях из общего числа 27 (67%) проявления кластера 1 могли быть связаны с флуктуациями гидростатического напора (апрель-май), с «гидросейсмами» при сильных телесейсмических землетрясениях, с процессами подготовки сильных землетрясений (до 50%) и др. природными и техногенными возмущениями.

Результаты:

**Представленный метод статистической обработки  
уровнемерных данных позволяет выделять скрытые в шуме  
кратковременные аномалии гидрогеодинамического режима скважины и  
является существенным дополнением к традиционной обработке  
уровнемерных данных, нацеленной на выделение низкочастотного тренда  
в изменениях уровня воды.**

Представленный метод может найти применение в задачах геофизического мониторинга сейсмоактивных территорий и поиска предвестников землетрясений при оперативной обработке данных уровнемерных наблюдений в скважинах.

**Условием применения метода является обеспечение  
непрерывности наблюдений и высокого качества исходных данных, а  
также применение процедуры компенсации баровариаций в изменениях  
уровня воды.**

Было обнаружено, что 67 % проявлений “аномального” кластера не имеет очевидной связи с сейсмическими или техногенными воздействиями, и это необходимо учитывать при использовании рассмотренного метода в задачах геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений.

## **2. Анализ изменений барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине ЮЗ-5, период наблюдений 27.07.2012 - 03.02.2018 гг.**

Выполнена обработка ряда среднечасовых вариаций уровня воды и атмосферного давления с использованием программы приливного анализа ETERNA 3.0 [Wenzel, 1991] в скользящем окне 30 суток с шагом 1 сутки и за весь период наблюдений.

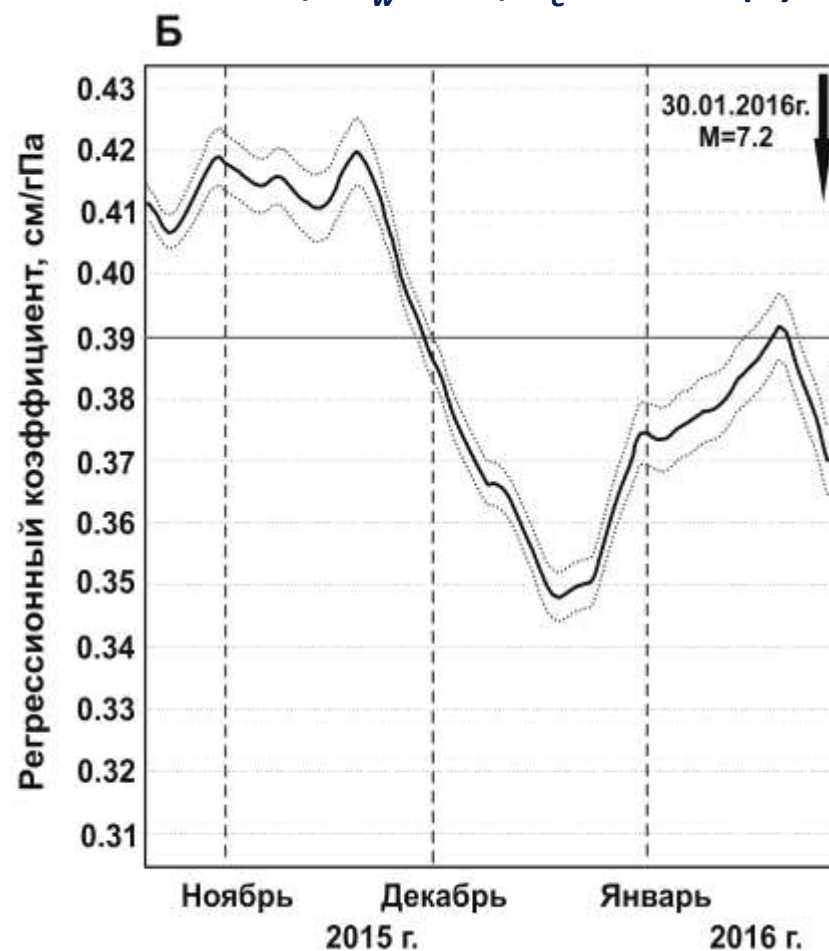
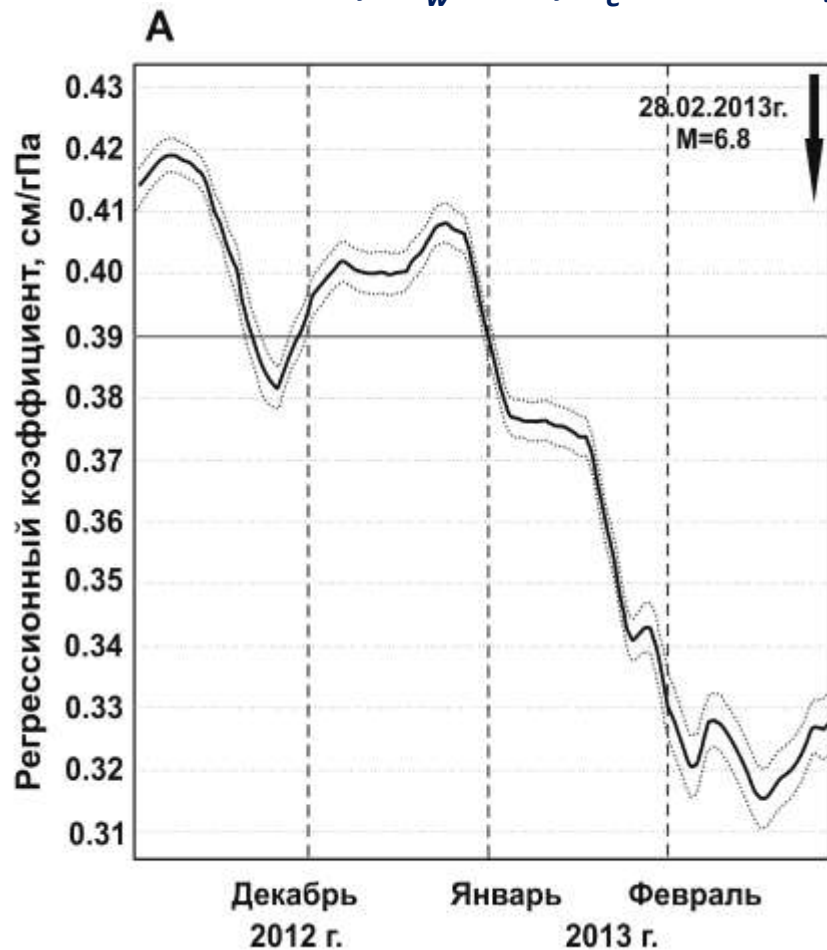
Получены временные ряды:

- **RC** (регрессионный коэффициент связи вариаций уровня воды и атмосферного давления - аналог величины барометрической эффективности  $E_b$ , см/гПа);
- параметров приливных волн суточной и полусуточной групп ( $O_1$ ,  $Q_1$ ,  $S_2$ ,  $K_2$ ,  $N_2$ ,  **$M_2$** ) в изменениях уровня воды - величин амплитуд, амплитудных факторов и фазовых сдвигов по отношению к соответствующим величинам теоретической объемной и площадной деформации в районе скважины;
- отношений сигнал/шум и ошибок определения **RC** и приливных параметров для всего ряда и в скользящем 30-суточном окне.

Дискретизация рядов – 1 сутки.

**Обнаружены закономерные изменения RC и приливных параметров (амплитуды и фазового сдвига волны  $M_2$ ) в изменениях уровня воды перед землетрясениями 28.02.2013 г.,  $M=6.8$  и 30.01.2016 г.,  $M=7.2$ .**

**Изменение RC (барометрической эффективности) перед землетрясениями  
28.03.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км (А) и 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км (Б)**



Уменьшение RC перед землетрясениями.

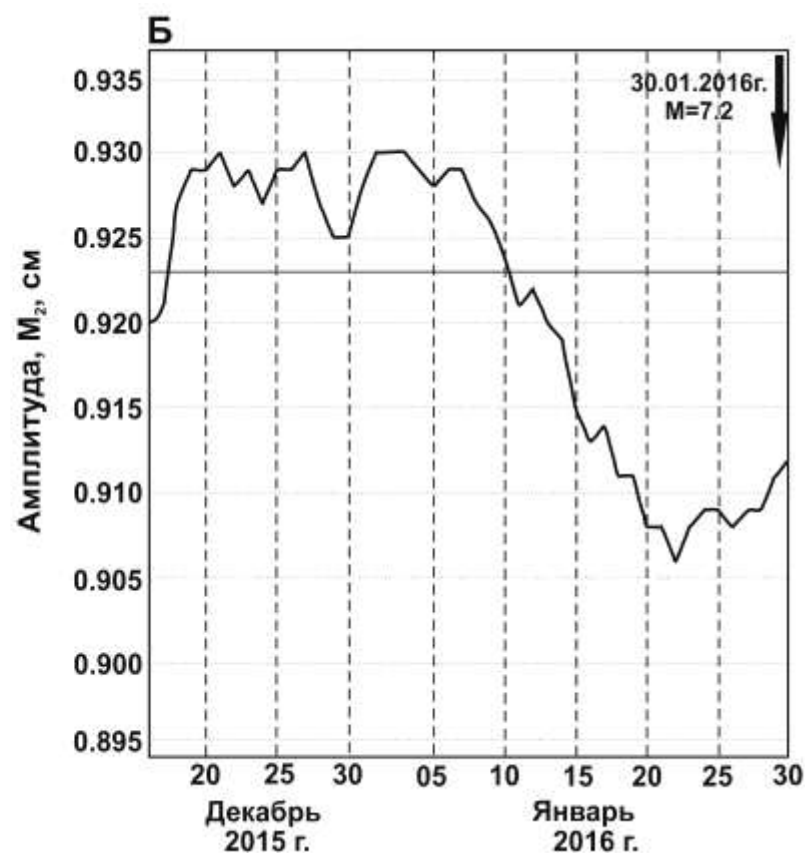
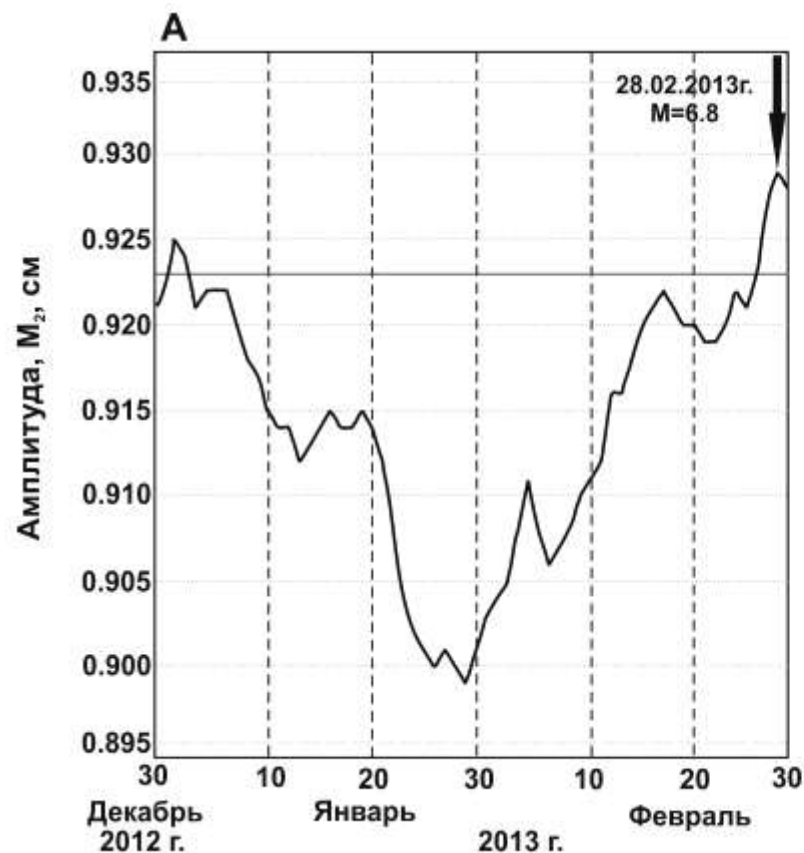
*Изменения RC показаны жирной черной линией.*

*Серые линии показывают диапазон определения RC с учетом ошибок определения.*

*Горизонтальная линия – средняя величина RC для всего ряда.*

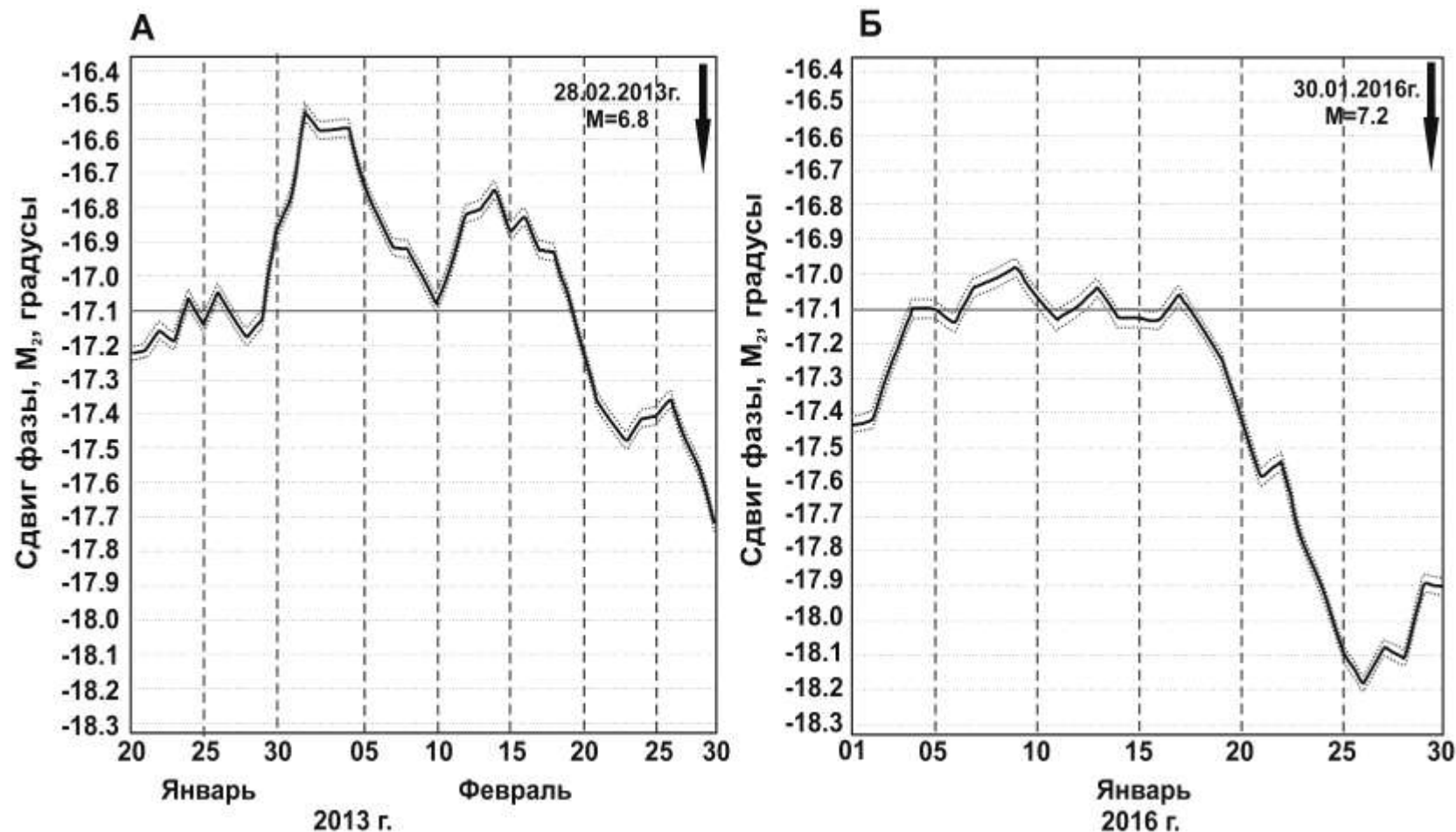
*Стрелка – момент землетрясения.*

**Изменение амплитуды волны  $M_2$  в изменениях уровня воды перед землетрясениями 28.03.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км (А) и 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км (Б)**



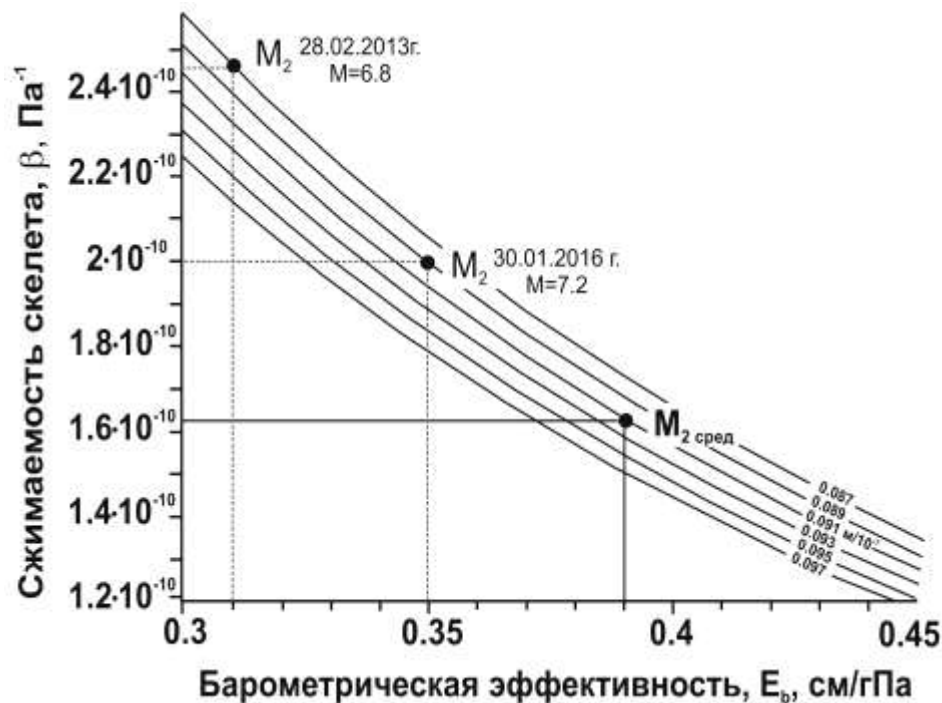
Уменьшение амплитуды волны  $M_2$  перед землетрясениями 28.03.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км (А) и 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км (Б).

**Изменение фазового сдвига волны  $M_2$  перед землетрясениями 28.03.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км (А) и 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км (Б)**



Увеличение фазового сдвига волны  $M_2$  в изменениях уровня воды перед землетрясениями 28.03.2013 г.,  $M_w = 6.8$ ,  $d_e = 260$  км (А) и 30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ,  $d_e = 80$  км (Б).

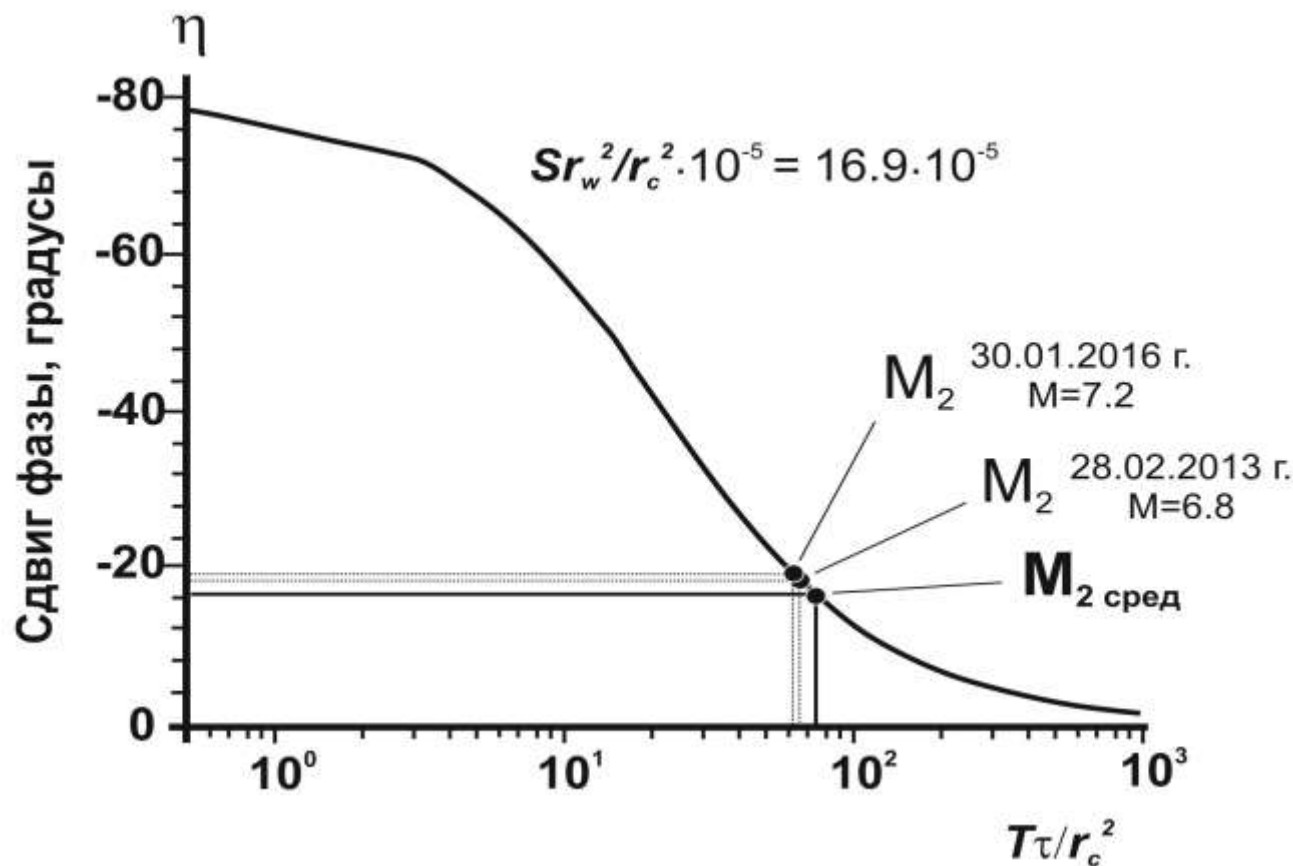
**Связь упругих параметров водовмещающих пород и величин  
барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности  
уровня воды  $A_s$  (для условий статически изолированного отклика уровня воды)  
[Болдина, Копылова, 2013]**



Эффект увеличения сжимаемости скелета водовмещающей породы  $\beta$  (слева) и пористости  $\phi$  (справа), а также величины коэффициента Скемптона  $B$ , при уменьшении величин барометрической эффективности  $E_b = RC$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  (по волне  $M_2$ ) по отношению к теоретической площадной деформации в диапазоне величин  $0.087\text{--}0.097 \text{ м/}10^{-7}$ ;

$M_2$  сред – средняя оценка амплитудного фактора  $A_s$  по волне  $M_2$  для всего ряда наблюдений; также показаны величины  $A_s$ , оцененные по волне  $M_2$  в периоды, предшествующие землетрясениям 28.02.2013 г и 30.01.2016 г.

**Зависимость сдвига фаз  $\eta$  между изменениями уровня воды и гармоническими вариациями напора в скважине ЮЗ-5 в зависимости от периода  $\tau$ , водопроводимости  $T$  и геометрических размеров скважины при величине  $Sr_w^2/r_c^2 = 16.9 \cdot 10^{-5}$   
[с использованием модели Hsieh et al., 1987]**



Изменения фазового сдвига волны  $M_2$  при различных значениях параметра  $T\tau/r_c^2$  и  $Sr_w^2/r_c^2 = 16.9 \cdot 10^{-5}$  для скв. ЮЗ-5: период волны  $M_2$  ( $\tau = 12.42$  ч),  $r_c$  – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды,  $r_w$  – радиус скважины в области ее связи с водовмещающими породами.

При увеличении сдвига фазы происходит смещение оценок параметра  $T\tau/r_c^2$  влево (уменьшение величины водопроводимости  $T$ ).

## **Заключение**

1. Представлены два новых метода обработки уровнемерных данных с использованием статистического и приливного анализа, которые расширяют возможности скважинных уровнемерных наблюдений для выделения средне-краткосрочных аномалий гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

Важным свойством метода статистического анализа уровнемерных данных является возможность выделения из шумовых вариаций уровня воды кратковременных аномальных гидрогеодинамических состояний наблюдательной скважины, что существенно дополняет традиционный метод анализа низкочастотного тренда в изменения давления подземной воды.

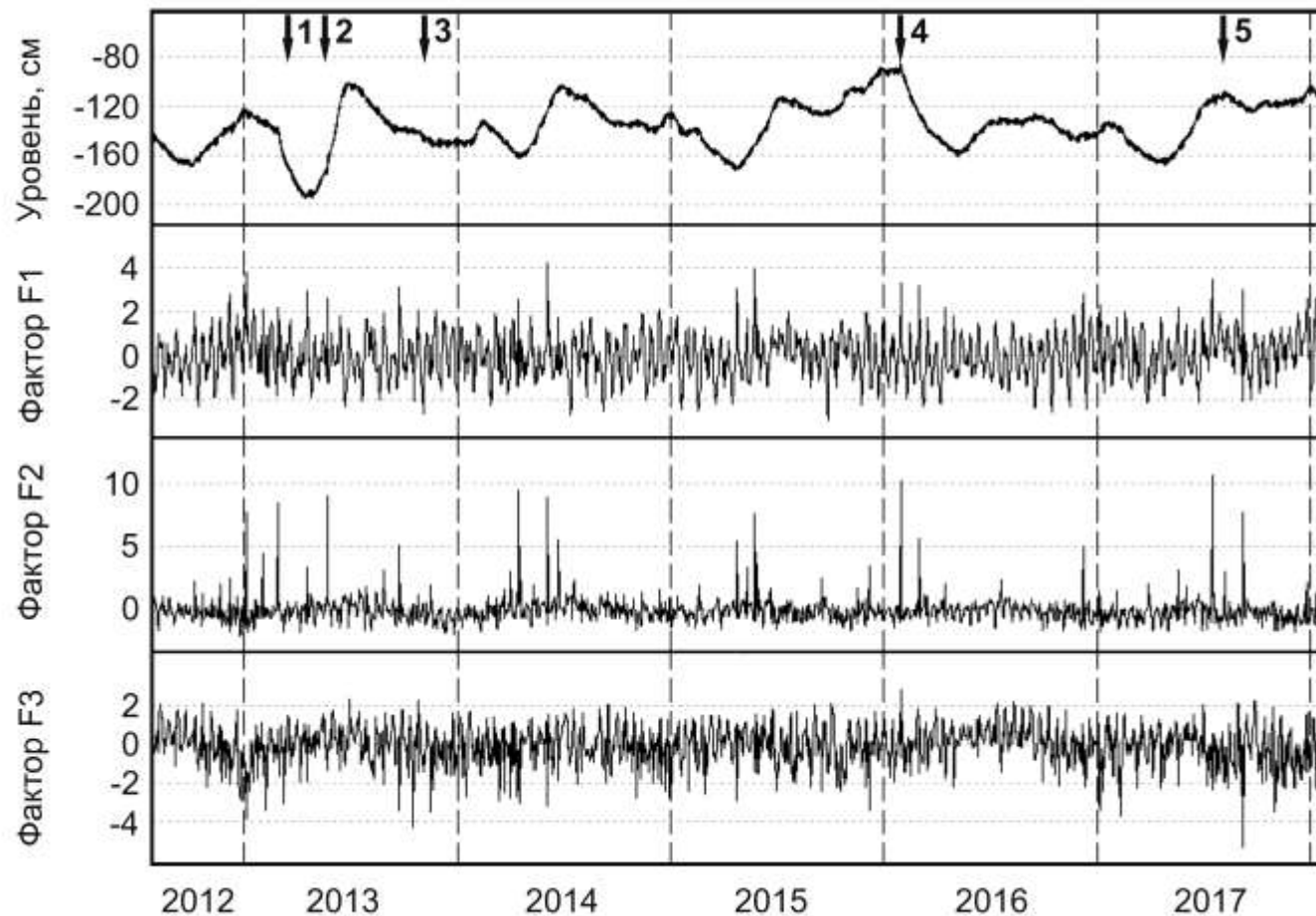
2. С использованием приливного анализа многолетних данных уровнемерных наблюдений обнаружены новые эффекты (возможные предвестники) на стадиях подготовки сильных землетрясений, проявляющиеся в уменьшении барометрической эффективности, уменьшении амплитуды и в увеличении фазового сдвига волны  $M_2$  в течение первых месяцев.

**3. Впервые получены оценки изменчивости пористости, упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород в течение первых месяцев перед двумя сильными землетрясениями.**

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№ 18-05-00337, 18-05-00133.

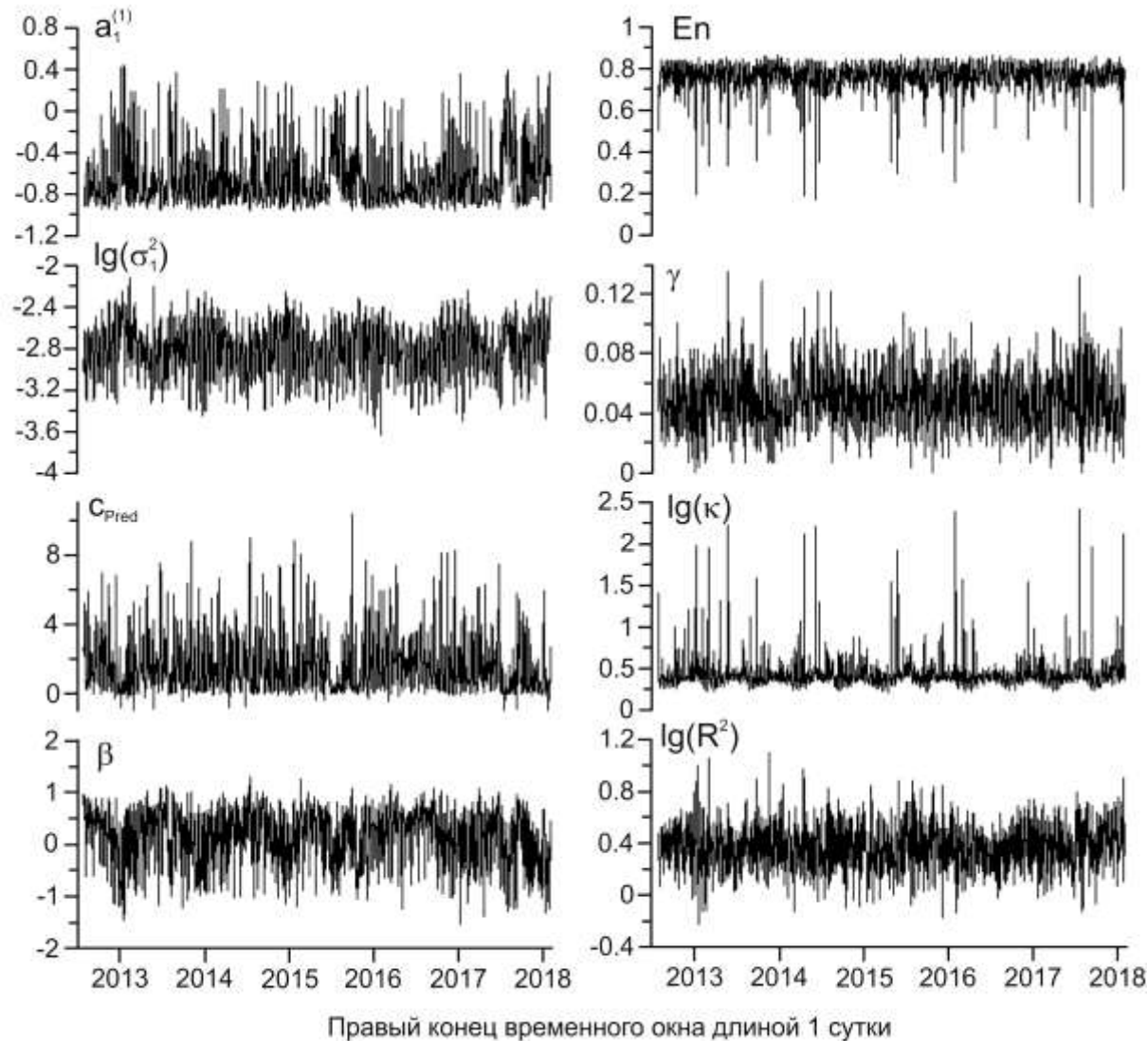
**Спасибо за внимание!**

## Общие ортогональные факторы F1, F2, F3



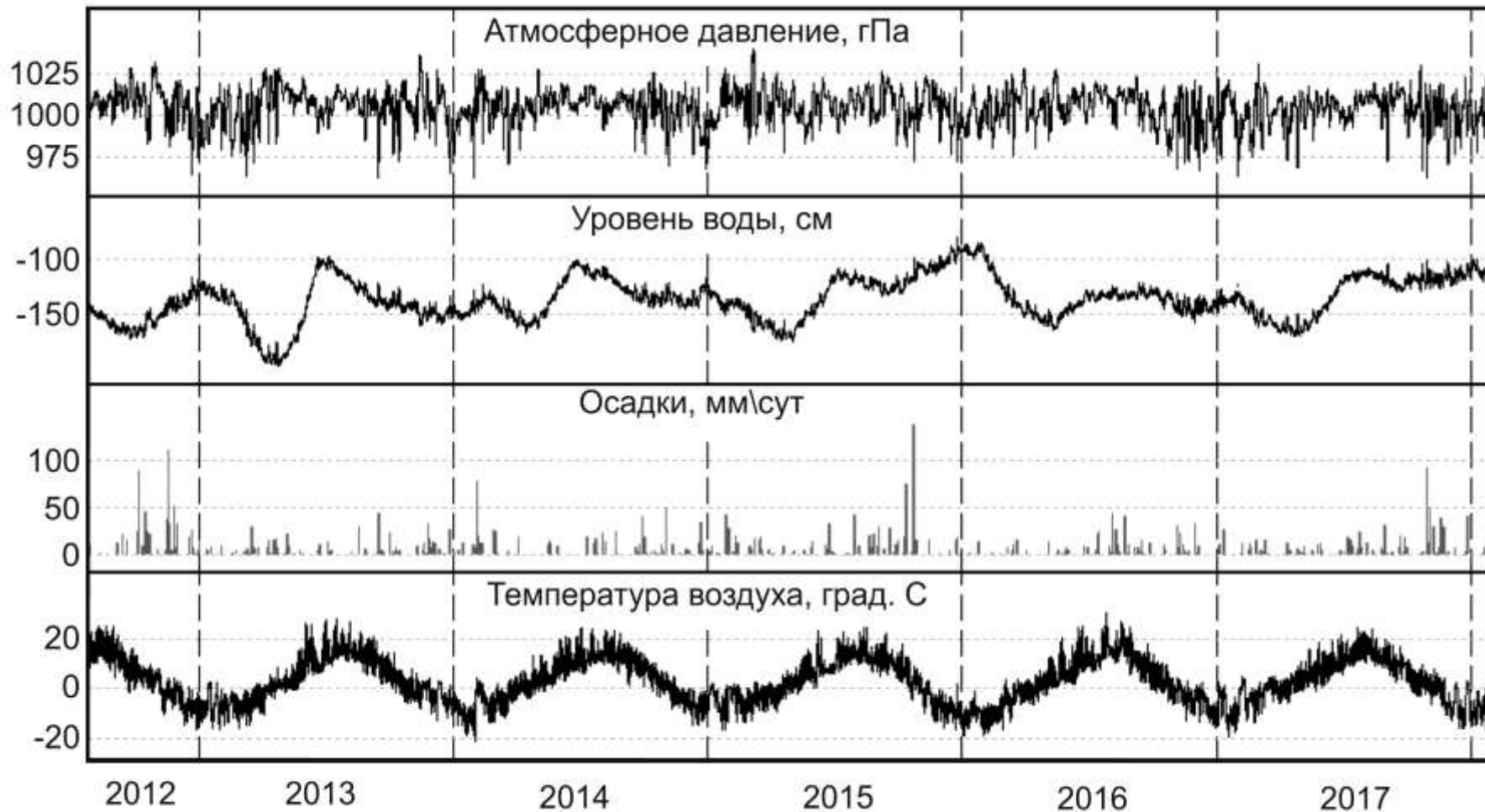
Графики ортогональных общих факторов F1, F2, F3 набора восьми свойств временного ряда уровня воды после компенсации влияния атмосферного давления (верхний график) в последовательных окнах длиной одни сутки. Стрелками показаны землетрясения.

## Изменения отдельных компонент 8-мерного вектора параметров



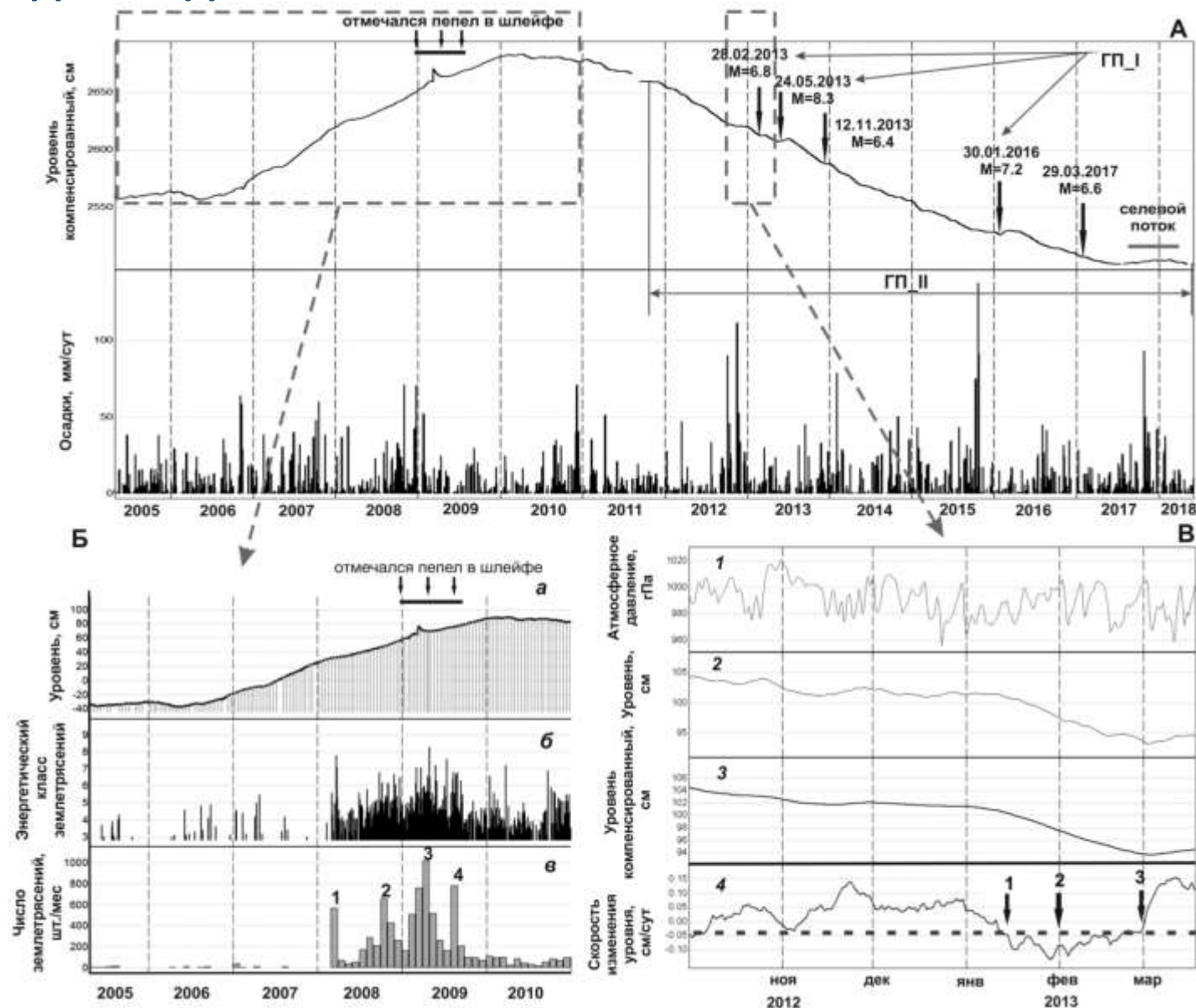
Графики восьми свойств временного ряда приращений уровня подземных вод после компенсации влияния атмосферного давления в последовательных окнах длиной одни сутки.

## Данные наблюдений в скв. ЮЗ-5 с 27.07.2012 по 01.02.2018 гг.



Данные 5-минутных наблюдений за вариациями атмосферного давления и уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 27.07.2012 по 01.02.2018 гг. в сопоставлении с изменениями температуры воздуха и осадками по данным метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю состояния окружающей среды.

# ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В РЕЖИМЕ СКВАЖИНЫ Е-1



ГП - гидрогеодинамические предвестники:

ГП\_I с временем упреждения от суток до десятков суток;

ГП\_II с временем упреждения до месяцев - нескольких лет.