

# Сейсмичность и микросейсмичность при воздействии на подземные флюидные системы.

---

С.Б. Турунтаев, Е.В. Зенченко, В.Ю. Рига

ИДГ РАН

ВНИИА



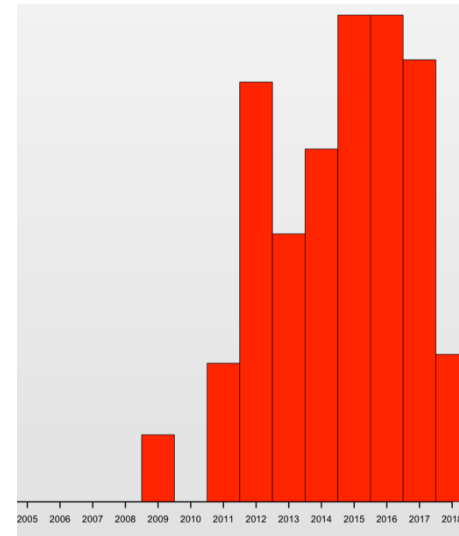
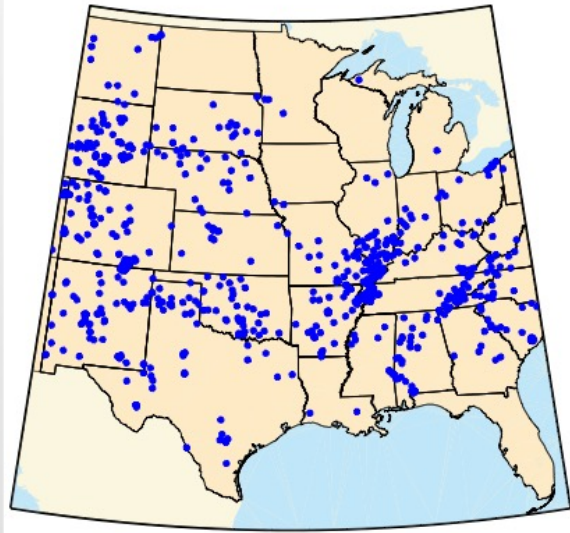
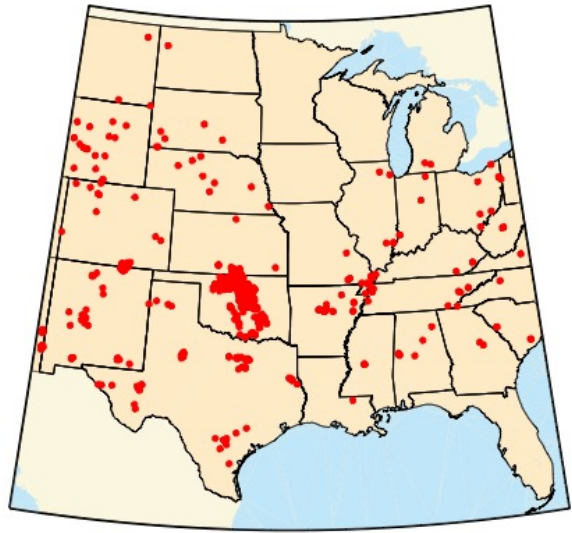
# Содержание

- Мотивация
- Примеры сейсмичности при воздействии на флюидные системы
- Активация естественных разломов и трещин при изменении пластового давления. Закон трения rate-and-state
- Оценка положения трещин ГРП
- Возможность оценки проницаемости пласта
- Заключение

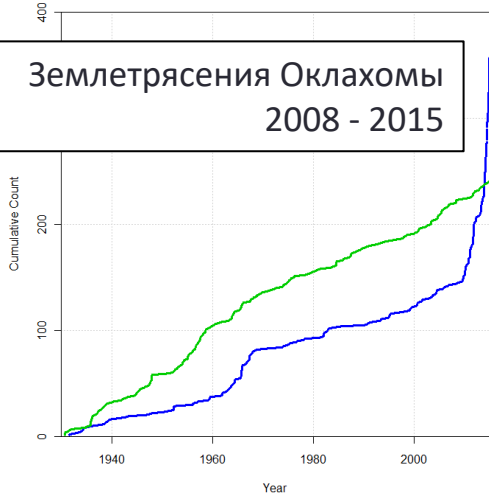
# Усиление сейсмической активности при разработке сланцевых месторождений нефти, США

2009-2015 361  $M \geq 3$  /год

1973-2008 24  $M \geq 3$  /год

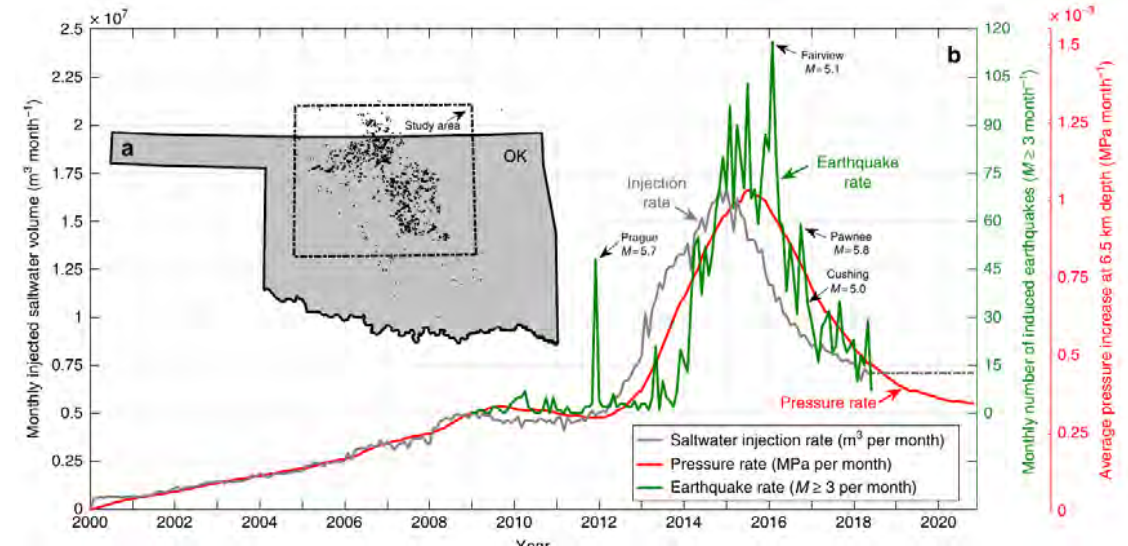


Землетрясения Оклахомы  
2008 - 2015



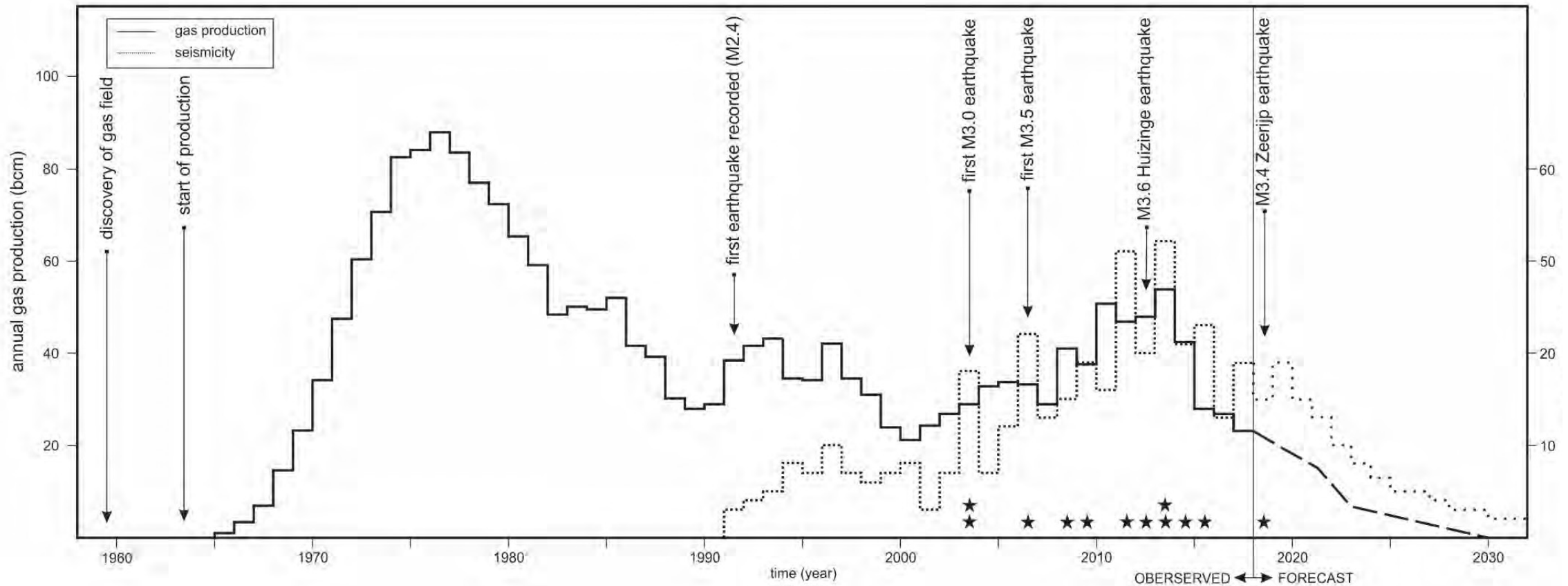
*William L. Ellsworth et al.*  
*Stanford Centre for Induced and Triggered Seismicity*

Сейсмичность в районе месторождений Оклахомы, США

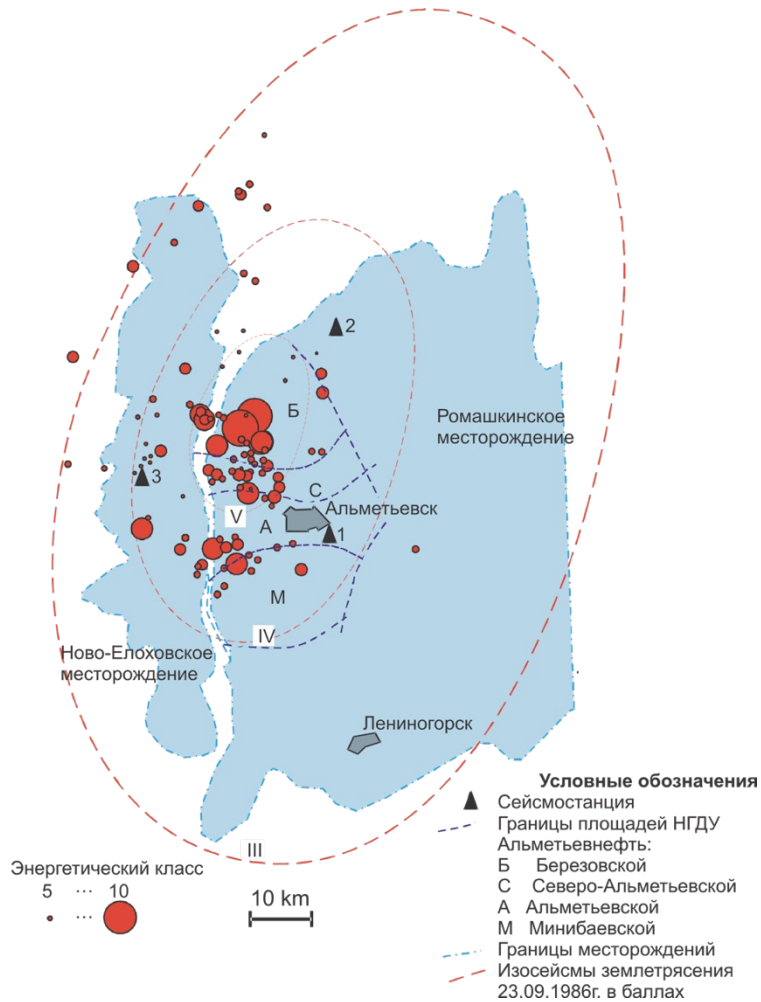


*Langenburch et al, 2018*

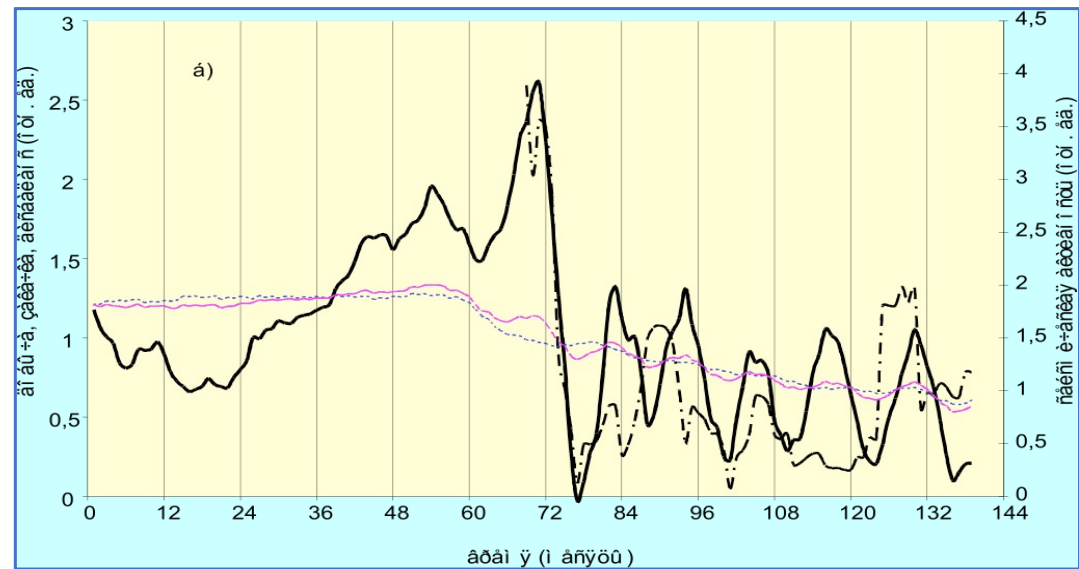
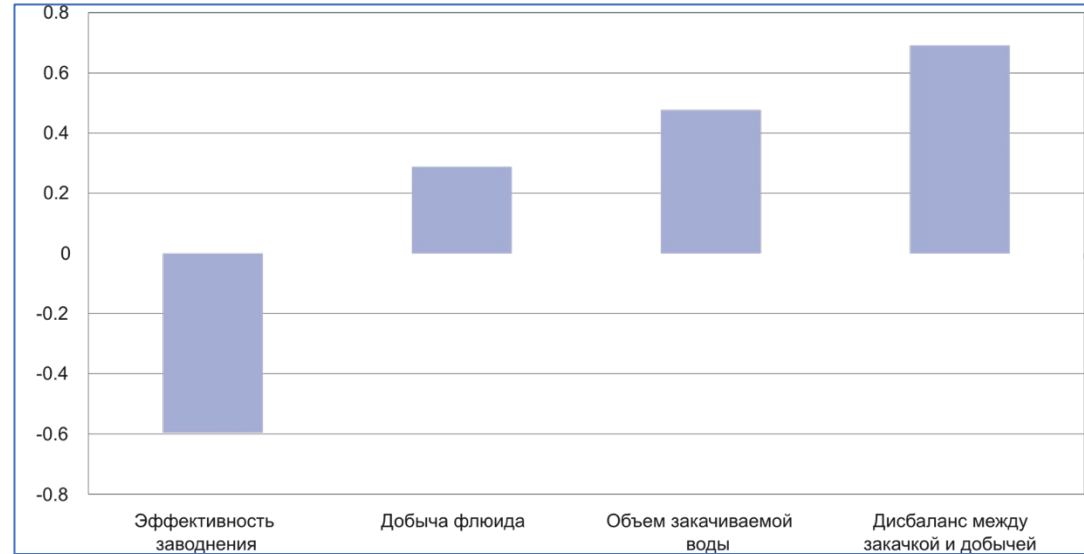
# Добыча газа и сейсмичность месторождения Гронинген, Нидерланды



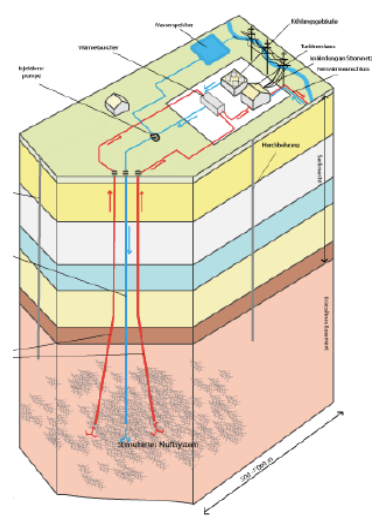
- Усиление техногенной сейсмичности вызывается дисбалансом между объемами закачанной и добытой жидкостями.
- Рост техногенной сейсмической активности ведет к падению эффективности мер по увеличению нефтеотдачи



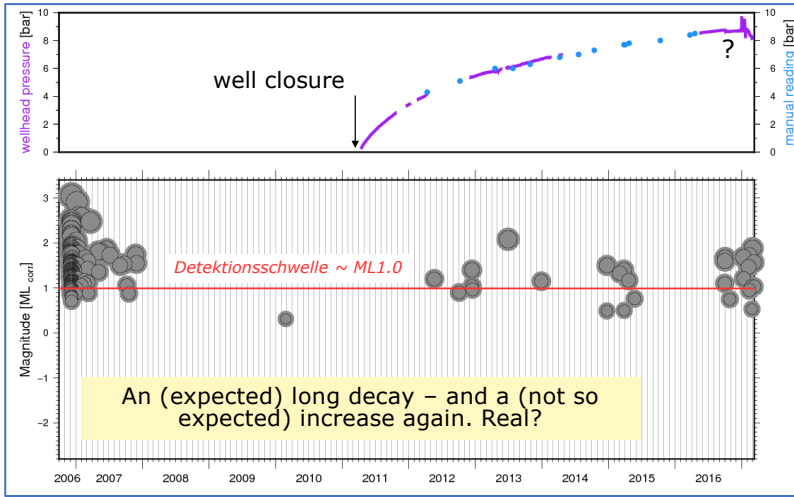
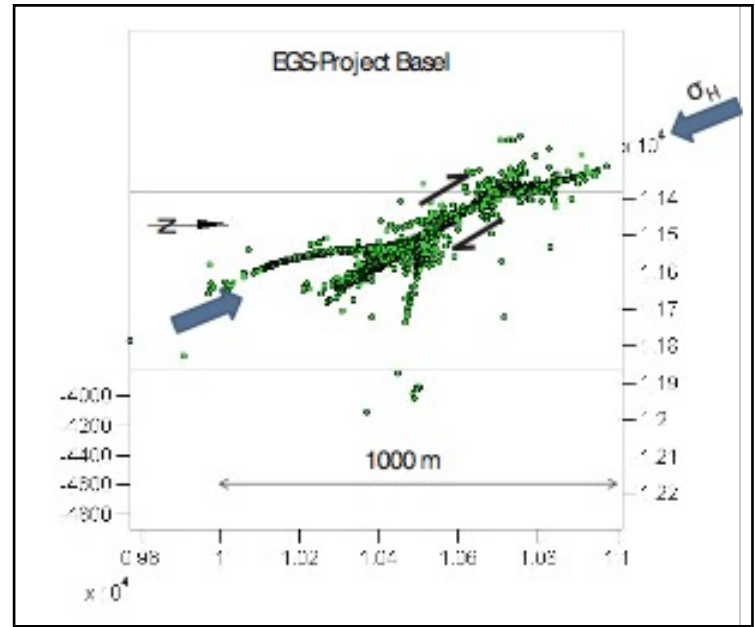
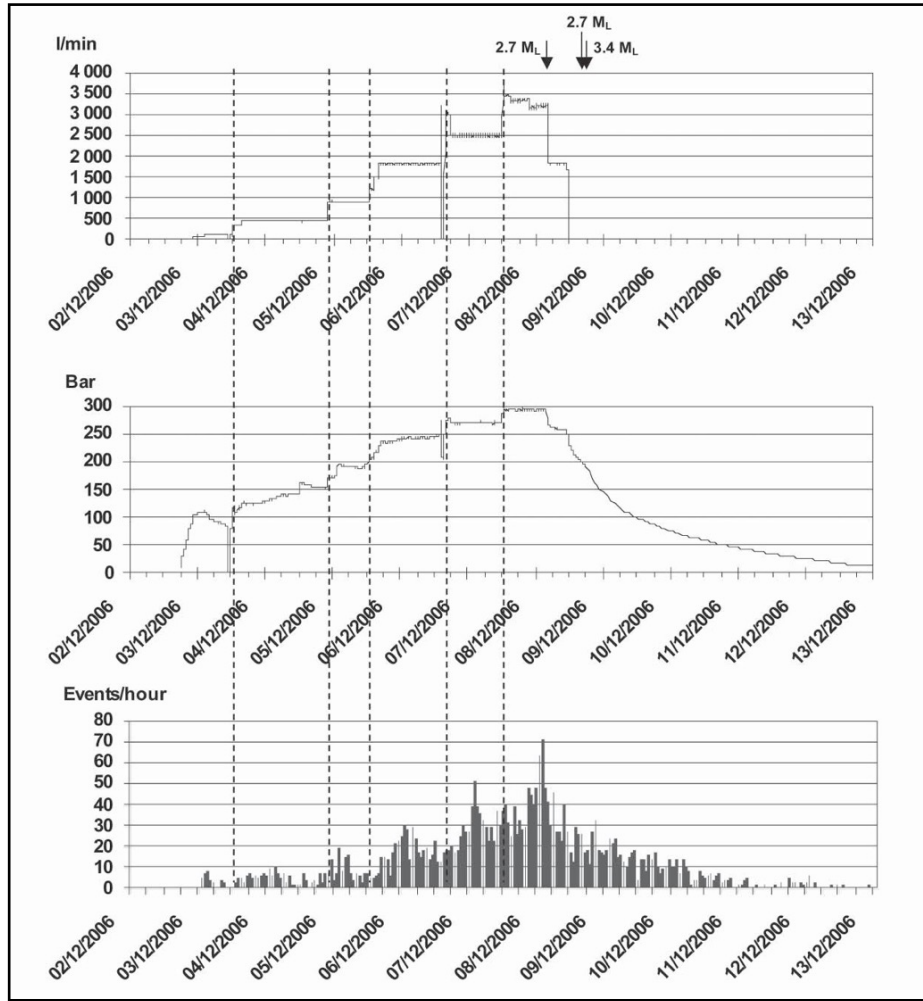
# Сейсмичность Ромашкинского месторождения нефти



# Базельский геотермальный проект

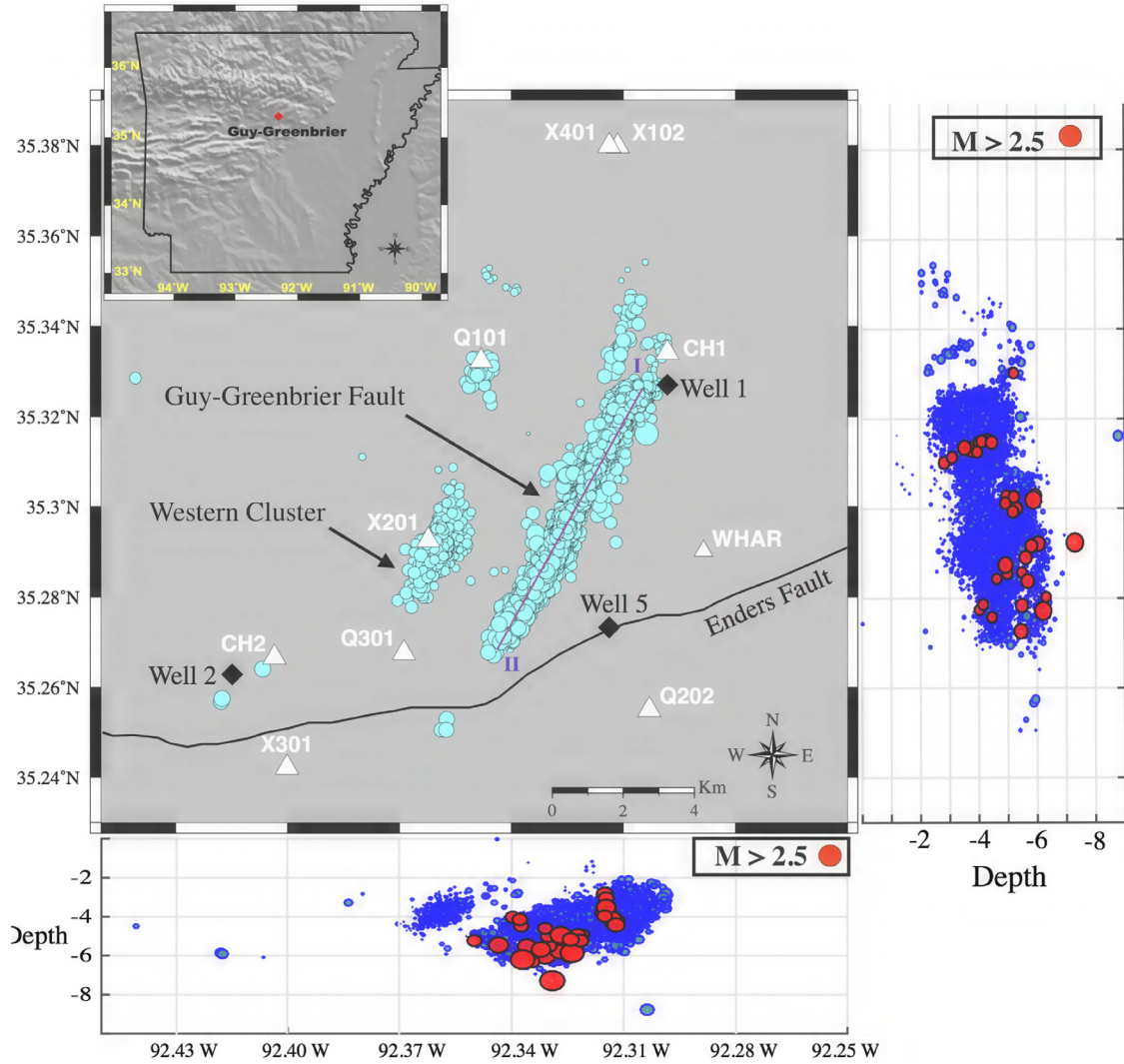


Basel (2006)  
(EGS)

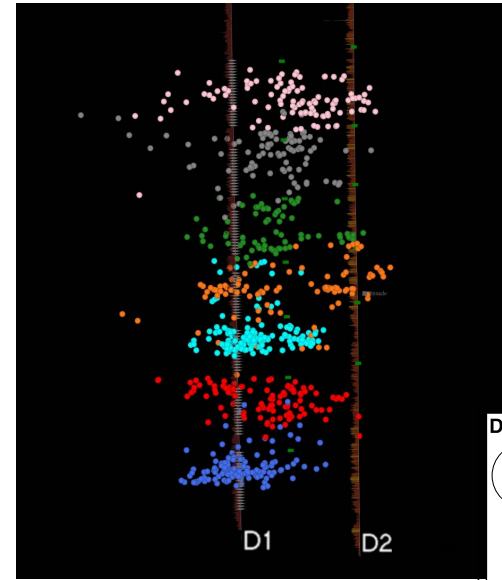


An (expected) long decay – and a (not so expected) increase again. Real?

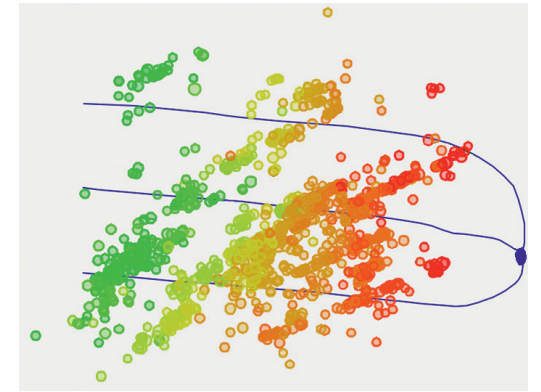
# Активируемые разломы и трещины ГРП выявляются сейсмическим мониторингом



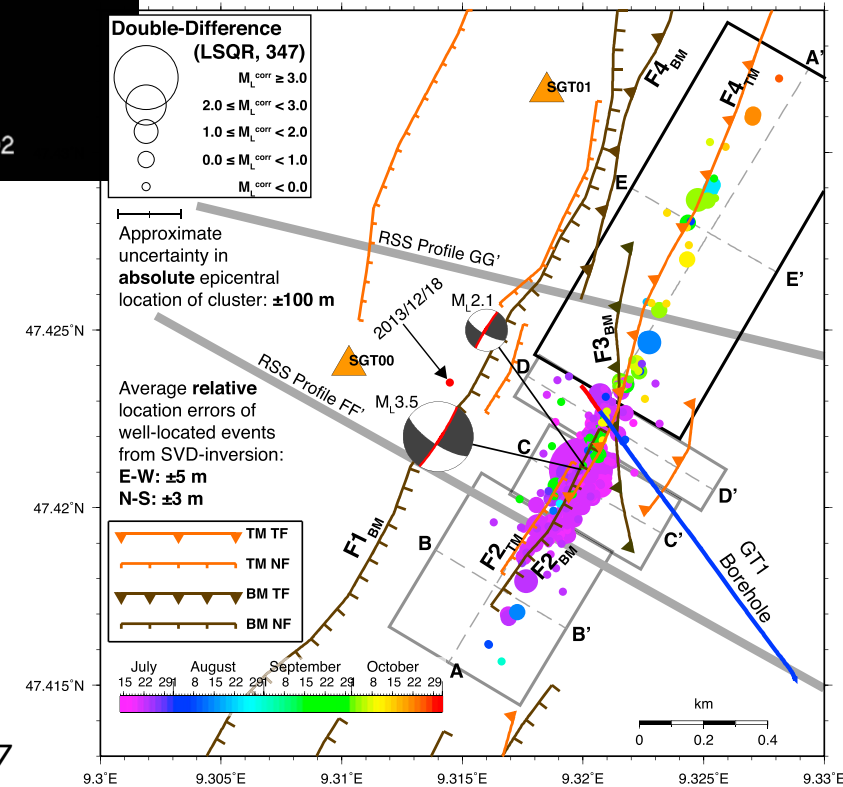
S. Mostafa Mousavi et al, 2017



Mohammad and Miskimins, 2010



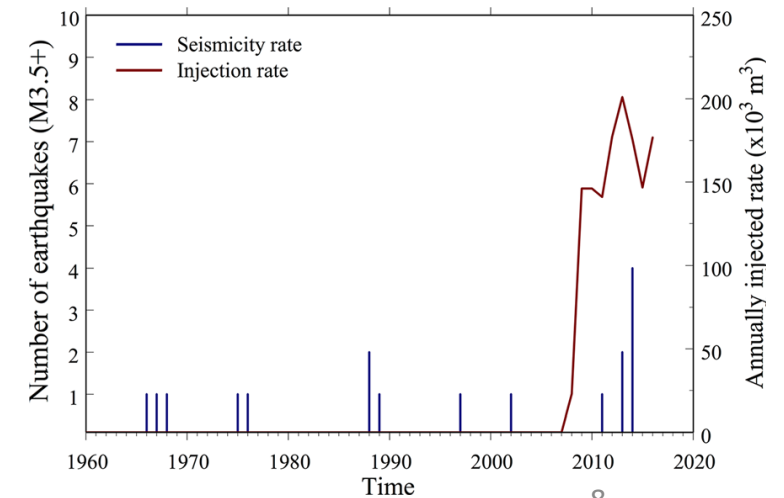
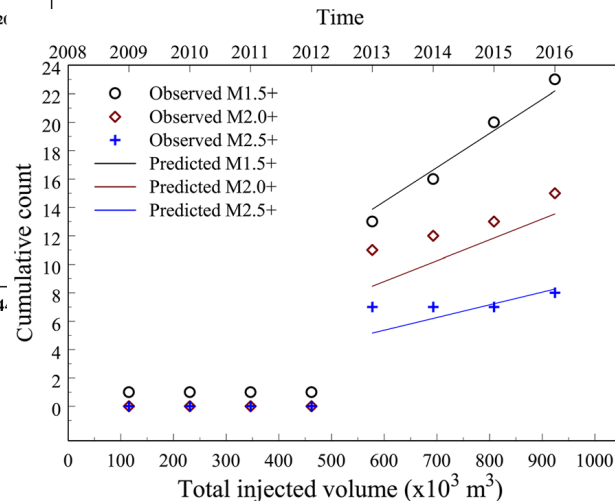
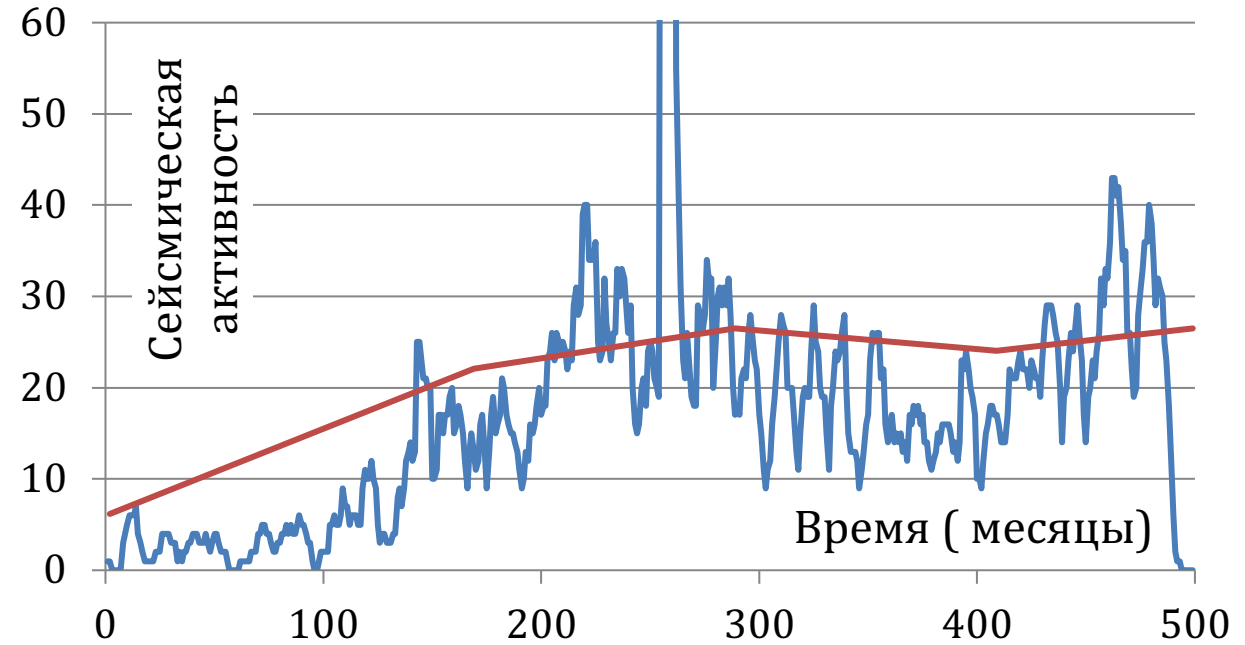
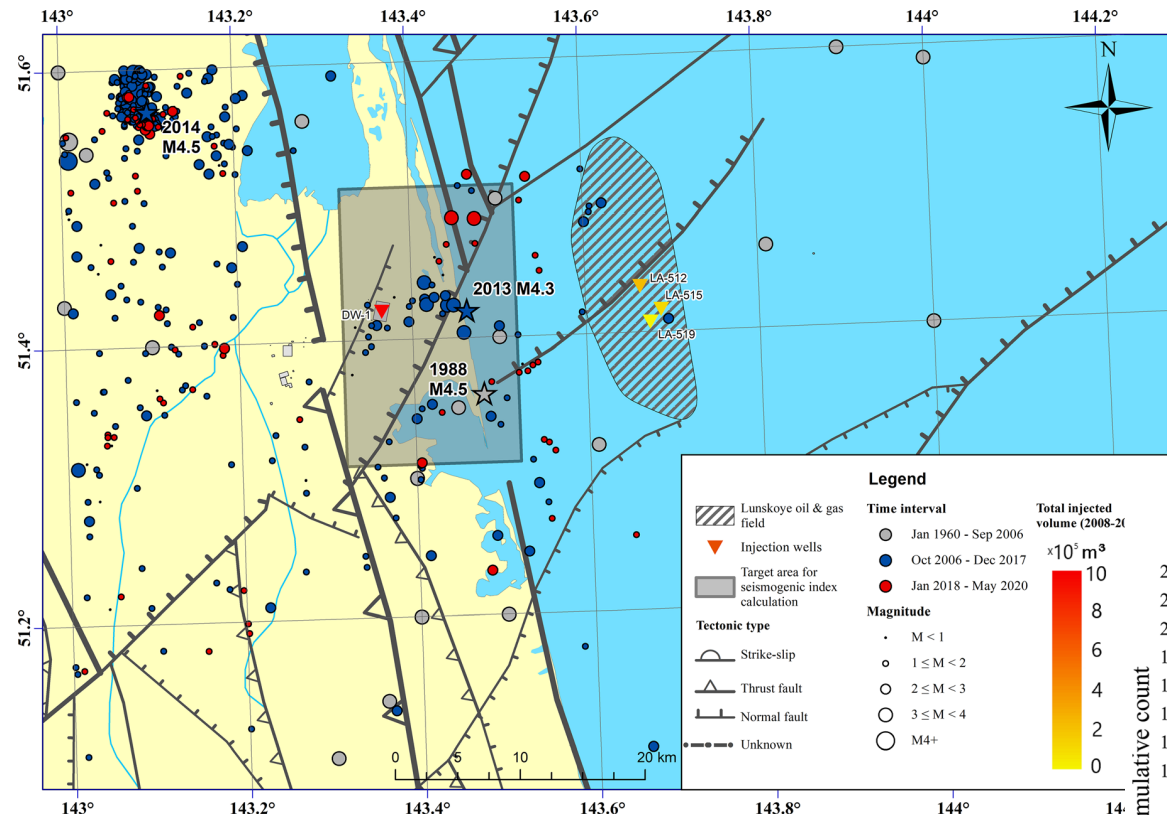
Ngoc-Tuyen Cao, Leo Eisner and Zuzana Jechumtálová, 2020



T. Diehl et al, 2017

# Сейсмичность в районе месторождений углеводородов шельфа о-ва Сахалин.

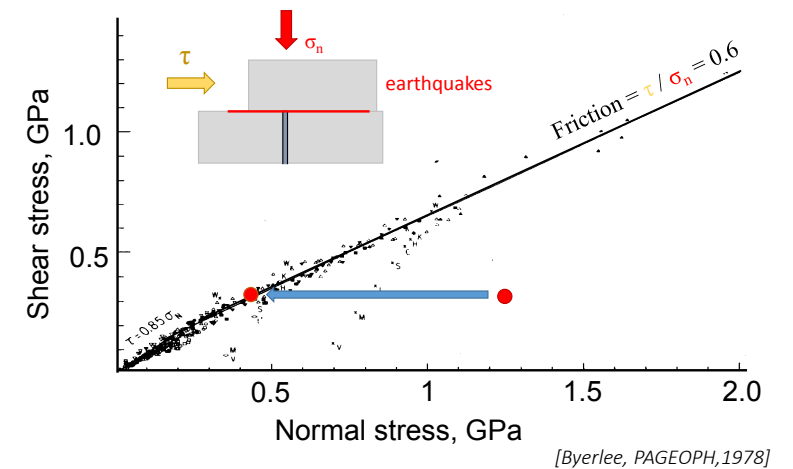
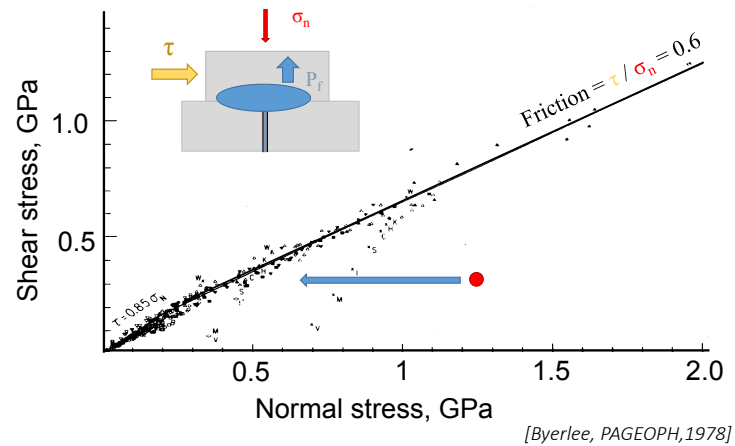
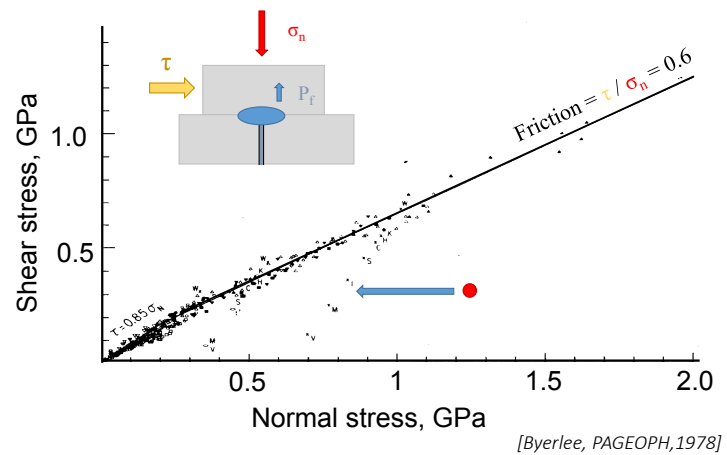
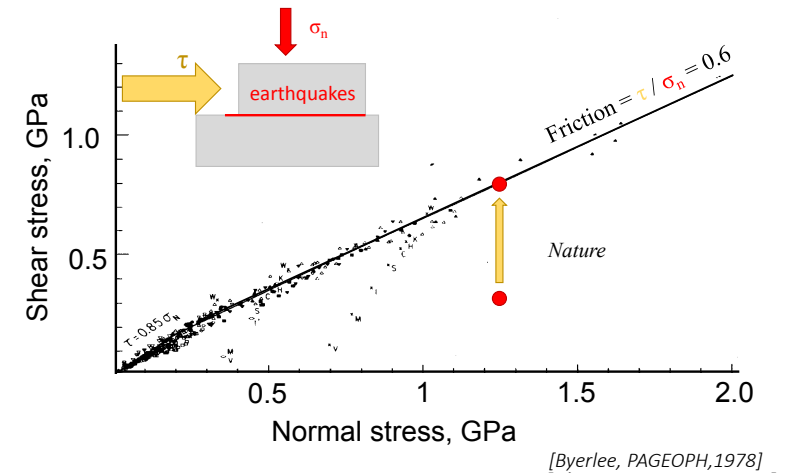
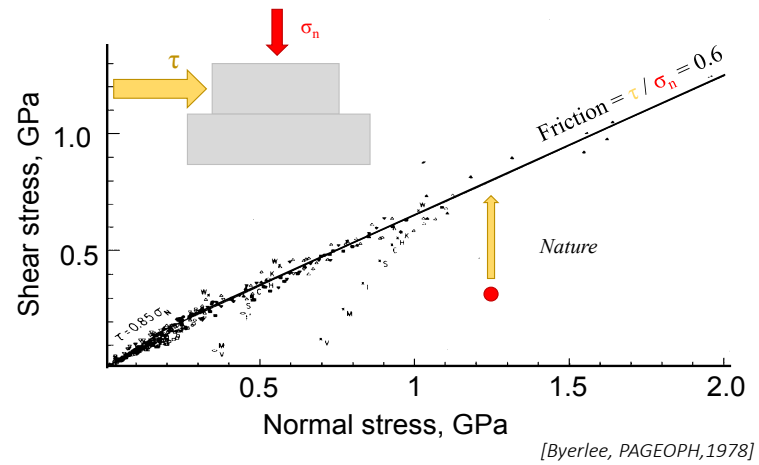
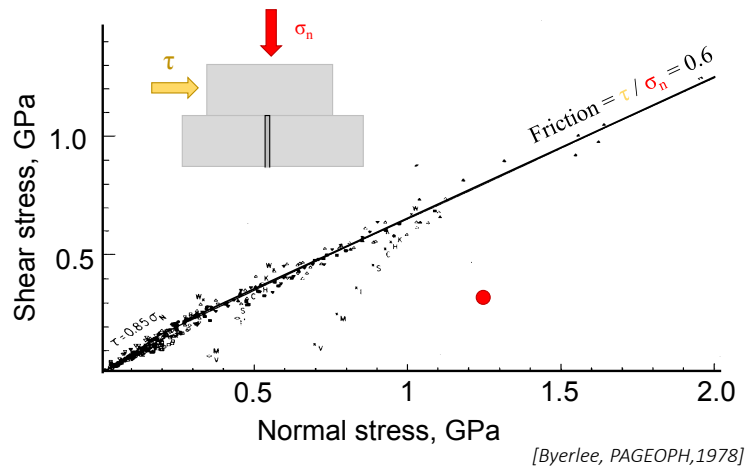
Изменение сейсмической активности и объема добычи нефти на о.Сахалин в период 1950-1991гг.



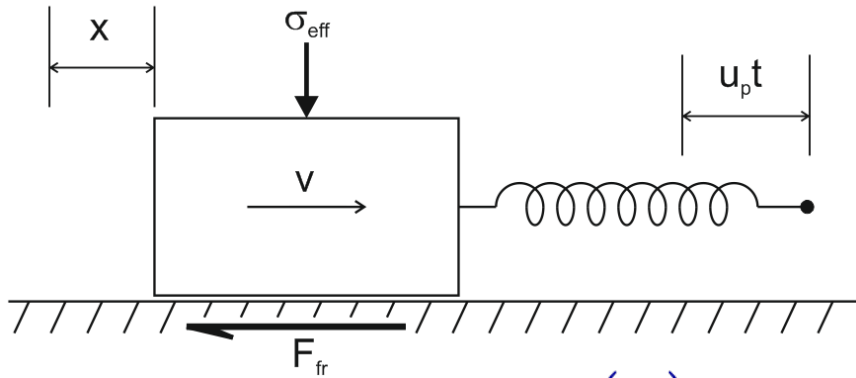
Konovalov, A.V., Stepnov, A.A. & Turuntaev, S.B. *Pure Appl. Geophys.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03006-y>



# Активация естественных разломов и трещин при изменении пластического давления



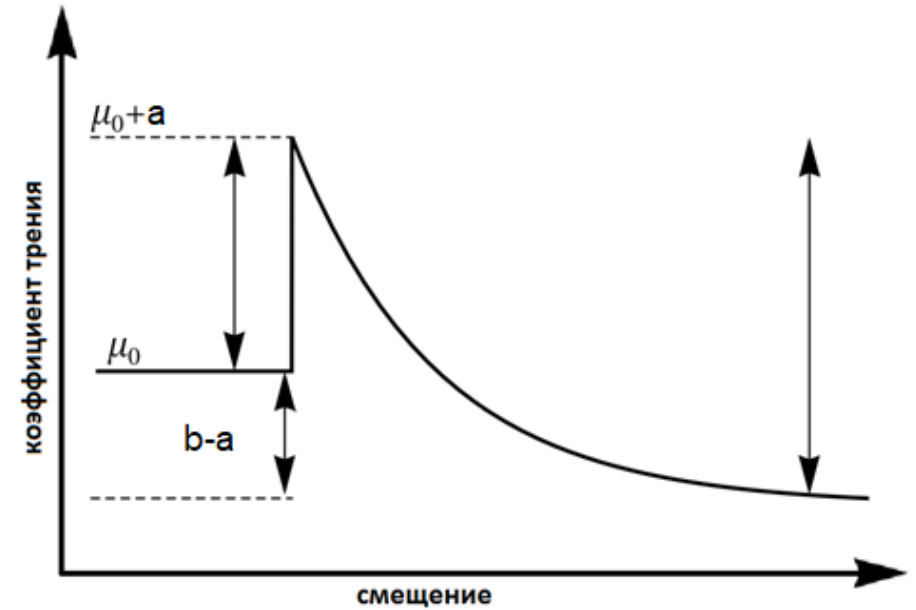
# Закон трения rate-and-state



$$\mu = \mu_0 + a \ln \left( \frac{v}{v_*} \right) + b \ln \left( \frac{v^* \theta}{L} \right)$$

Переменная состояния  
шероховатостей

$$\dot{\theta} = 1 - \left( \frac{|v| \theta}{L} \right)$$



Слагаемое **a** отвечает за упрочнение с возрастанием скорости,  
**b** – за разупрочнение

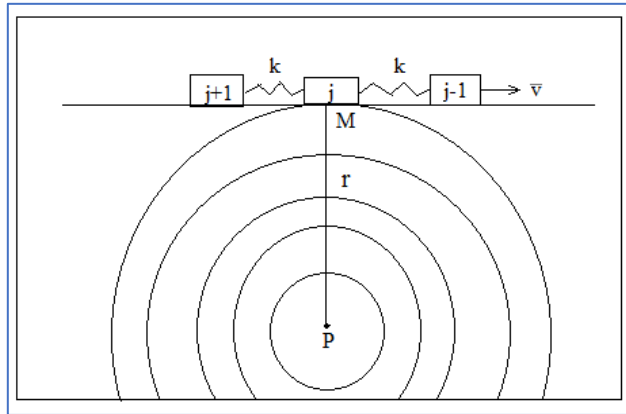
При стабильном скольжении (со скоростью слайдера)

$$\mu = \mu_0 + (b - a) \ln \left( \frac{v_0}{v_*} \right)$$

Условие возникновения неустойчивого скольжения

$$\begin{cases} \frac{d\tau_{ss}(v_0)}{dv_0} < 0 \Rightarrow b > a \\ k < k_{cr} \end{cases}$$

# Модель сейсмичности при изменении порового давления



$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} p \right)$$

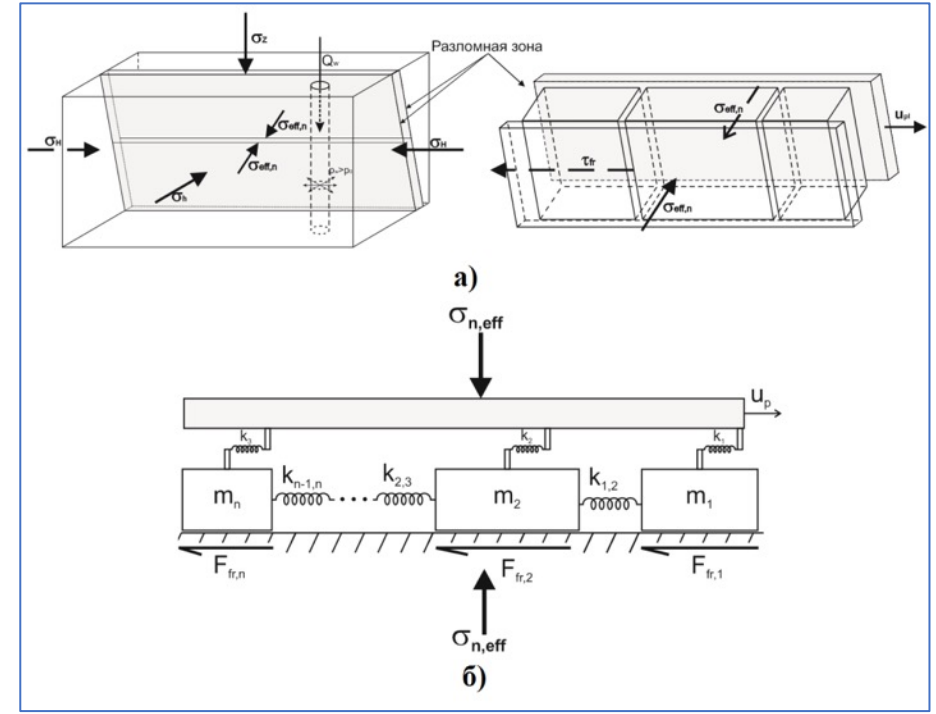
$$p = \frac{Q_0 \mu}{4\pi k h} Ei\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) + p_0$$

$$Ei(t) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(v_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_{fr1} \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(v_0 t - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - F_{fr2} \\ \dots \end{cases}$$

$$F_{fr} = (\tau_0 + \mu(\sigma_n - p) + A \ln\left(\frac{|v|}{v^*}\right) + \theta_1 + \theta_2)S + \eta v$$

$$\dot{\theta}_i = -\frac{v}{L_i} (\theta_i + B_i \ln(v/v^*))$$



$$M_0 = G \int D dS$$

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.06$$

(Talwani and Acree, 1985, Shapiro et al., 2006, Dinske et al., 2012, McClure, 2012, Willis-Richards et al., 1996; Rahman et al., 2002; Ghassemi and Tarasovs, 2006; Kohl and Mège, 2007; Bruel, 2007; Baisch et al., 2010; Rachez and Gentier, 2010; Deng et al., 2011)

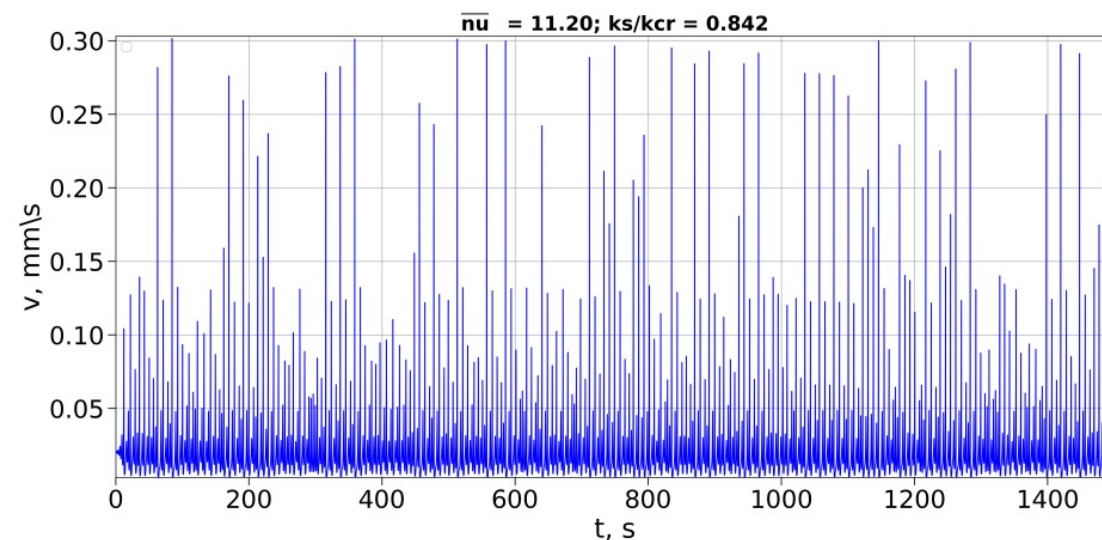
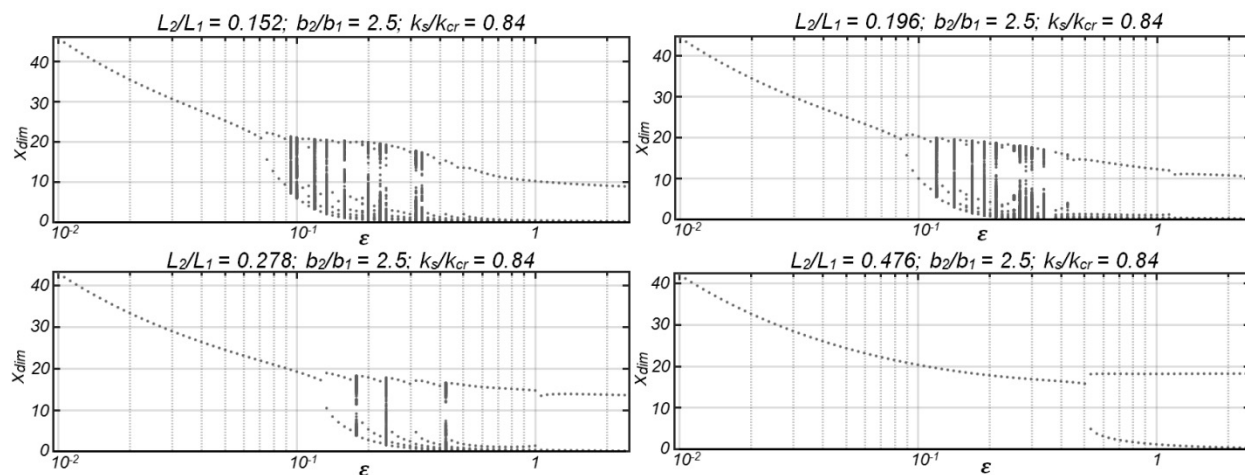
Наблюдаемая сейсмичность, как и скольжение в лабораторных условиях, носит хаотический характер. Однопараметрический закон трения не позволяет описывать апериодическое движение, в отличие от двухпараметрического

$$\mu = \mu_0 + a \ln \left( \frac{v}{v_*} \right) + \theta_1 + \theta_2$$

$$\dot{\theta}_i = -\frac{v}{L_i} \left[ \theta_i + b_i \ln \left( \frac{v}{v_*} \right) \right]$$

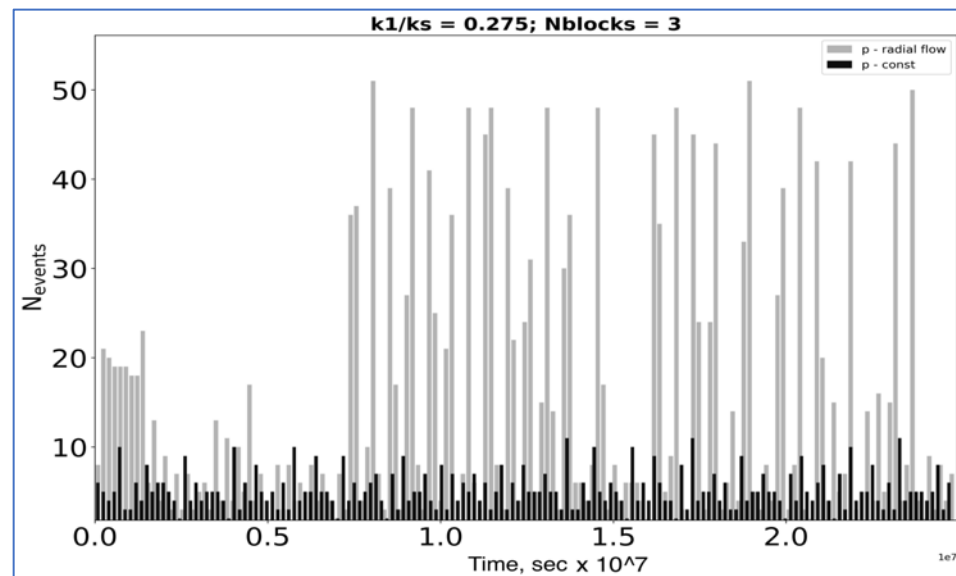
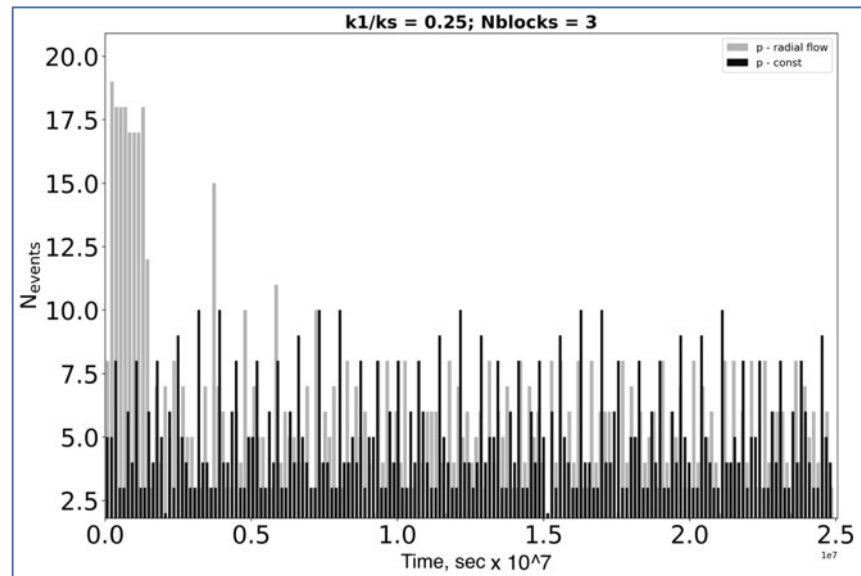
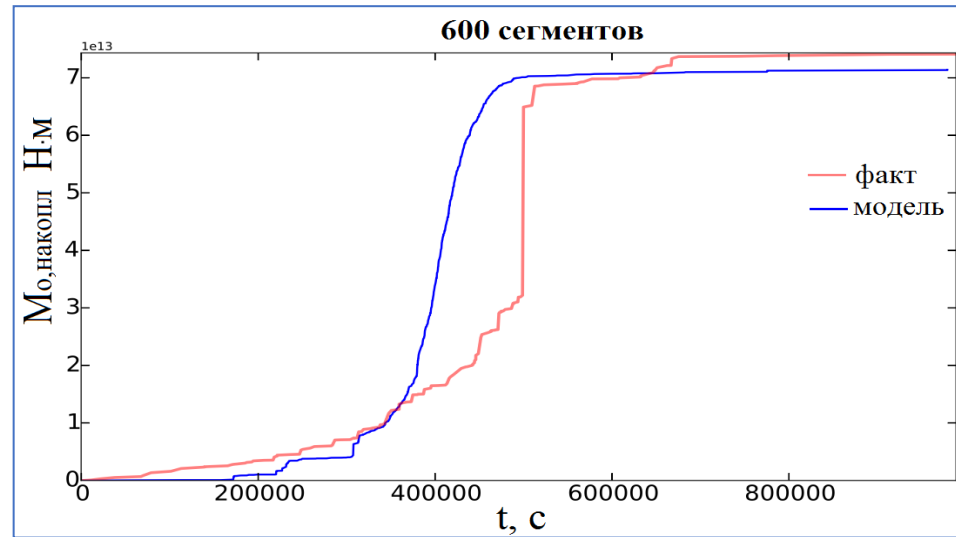
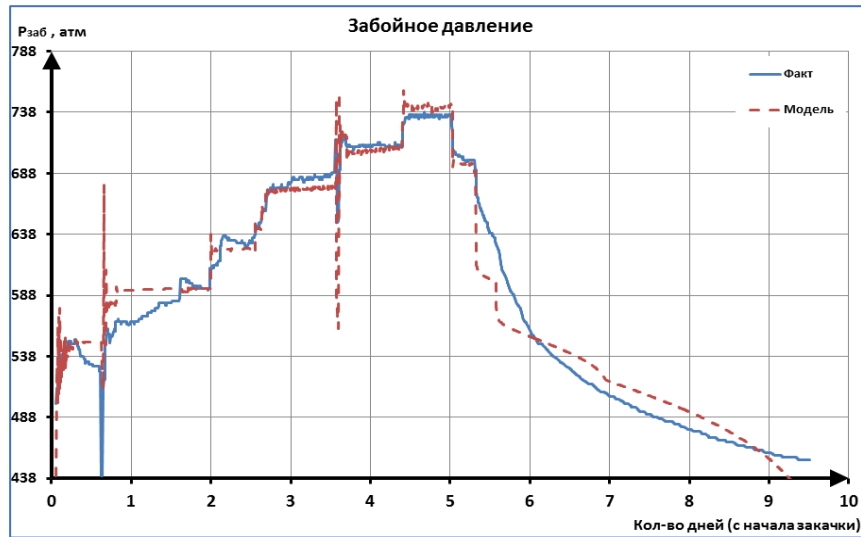
$$\hat{k}_{cr} = \left[ (\beta_1 - 1) + \rho^2(\beta_2 - 1) + 2\rho(\beta_1 + \beta_1 - 1) + \sqrt{\{[(\beta_1 - 1) + \rho^2(\beta_2 - 1)]^2 + 4\rho^2(\beta_1 + \beta_1 - 1)\}} \right] / (4\rho)$$

$$\hat{k}_{cr} = \frac{k_{cr}(L_1 + L_2)}{2AS}, \beta_1 = \frac{B_1}{A}, \beta_2 = \frac{B_2}{A}, \rho = \frac{L_1}{L_2}$$

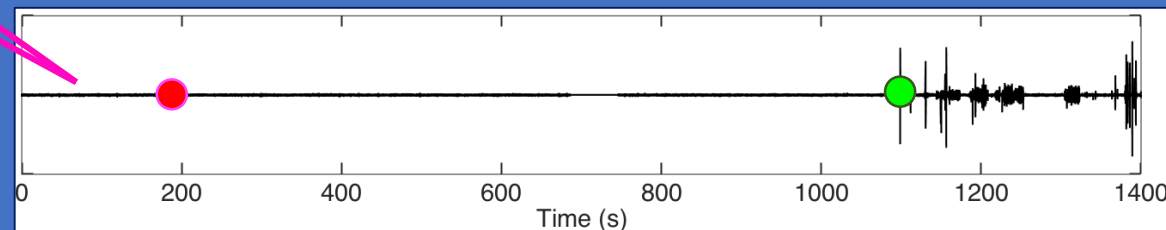
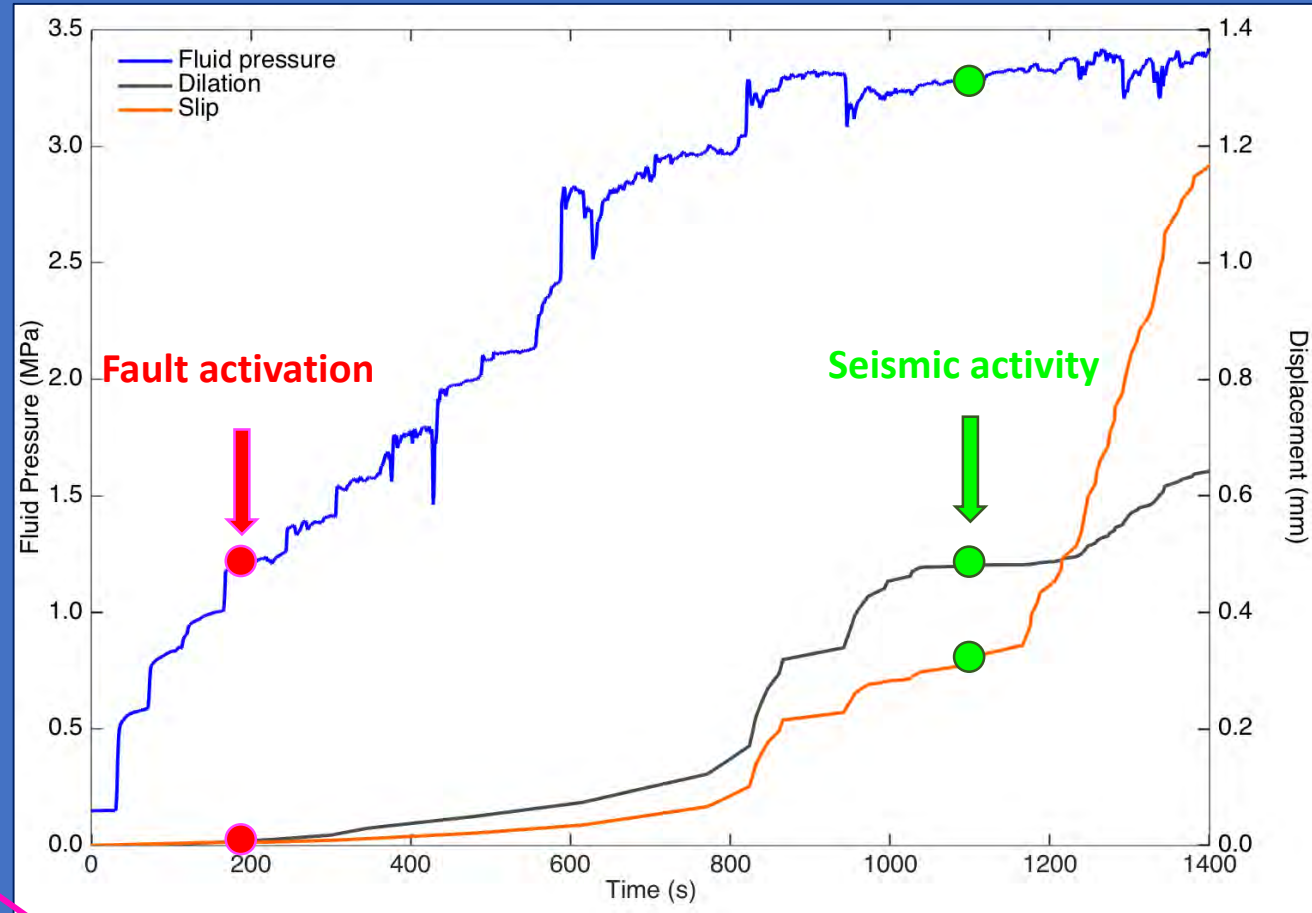
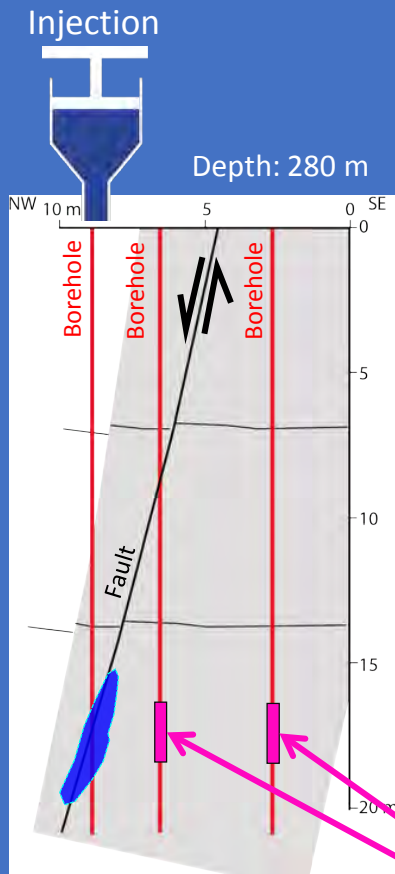


По вертикальной оси - карта безразмерных координат блока точек отображения Пуанкаре; по горизонтальной – значение величины  $\varepsilon = \frac{b-a}{a}$ . Показаны случаи для различных соотношений величины  $L_2/L_1$

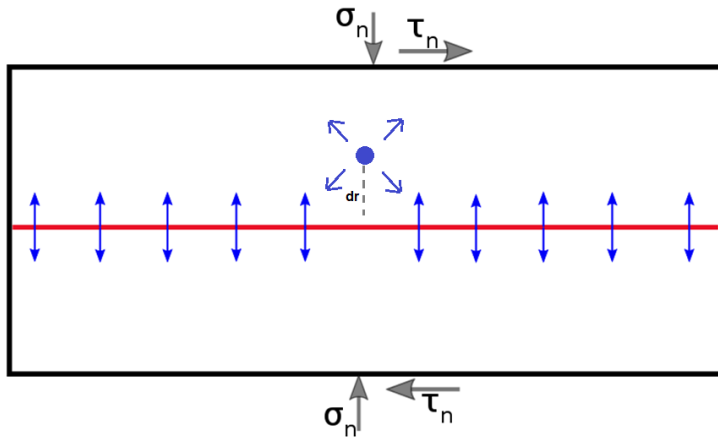
# Применение модели для случая Базеля



# Aseismic slip before the seismicity starts

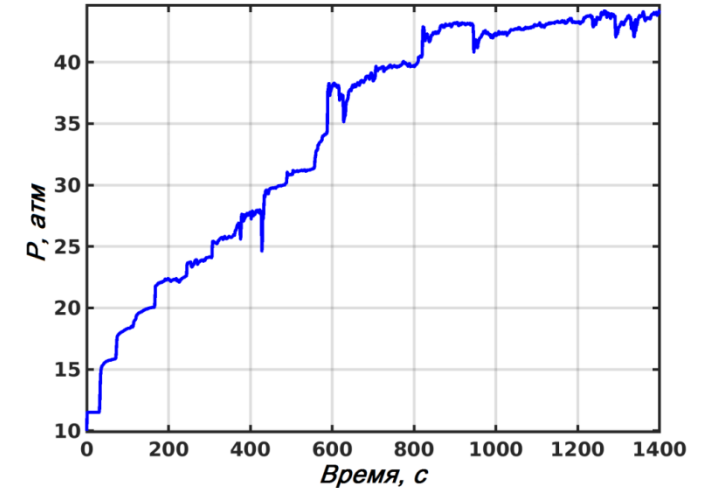


# Влияние параметров закачки и свойств разлома на процесс скольжения



Проницаемый разлом (начальная ширина ~10 мкм, проницаемость 8 Д) находится в малопроницаемой породе (2 мкД). В результате закачки происходит асейсмическое скольжение трещины. Характерное смещение в центральной части 600 мкм.

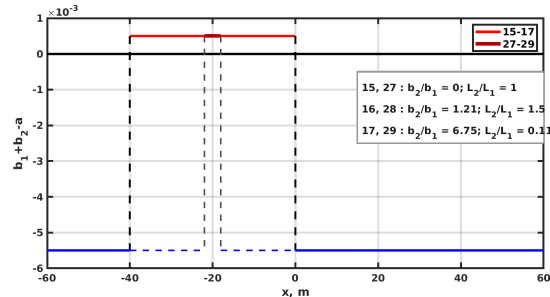
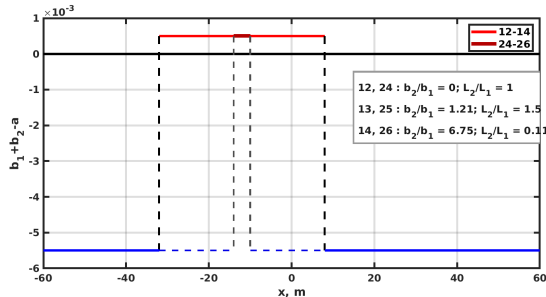
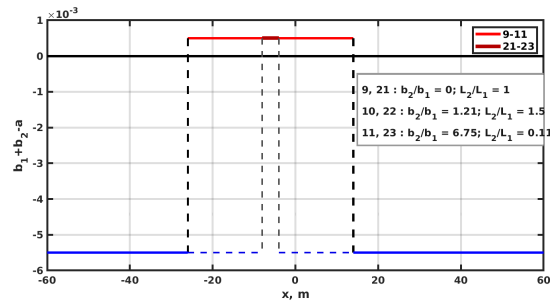
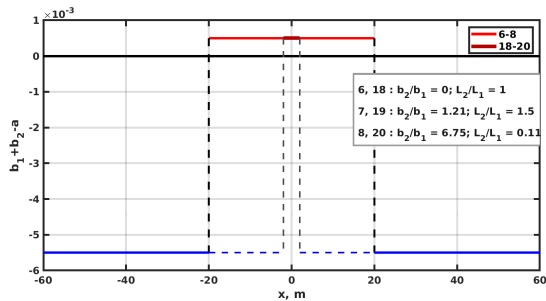
Нормальное напряжение: 4.25 МПа  
 Касательное напряжение: 1.65-2 Мпа  
 $G = 9 \cdot 10^9$  м Па  
 $\kappa_n = 2 \cdot 10^{11}$  Па/м (базовый вариант)



Забойное давление в скважине

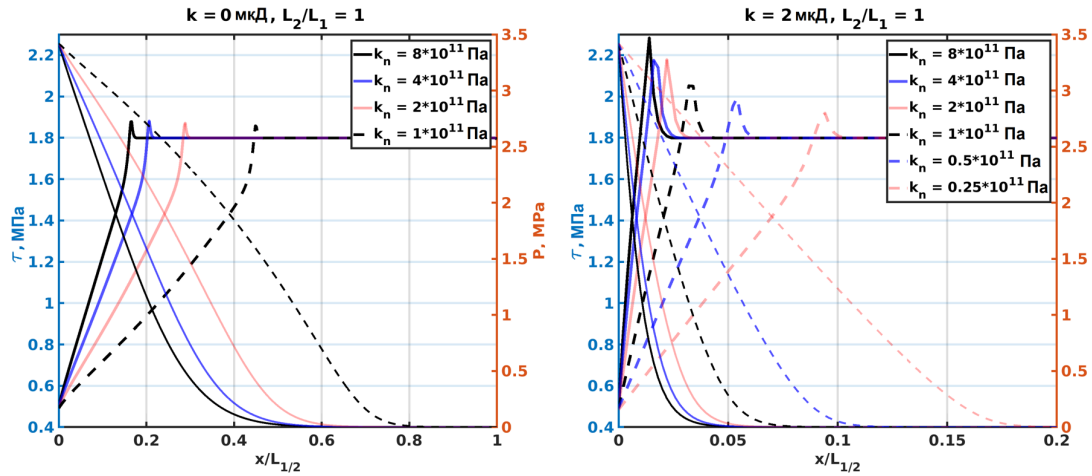
## Зона разупрочнения

## Зона упрочнения



Рассматривались различные конфигурации расположения закачивающей скважины и области разупрочнения на разломе, различные темпы закачки жидкости, варьировалась проницаемость породы, нормальная жесткость разлома, параметры закона трения

# Влияние параметров закачки и свойств разлома на процесс скольжения



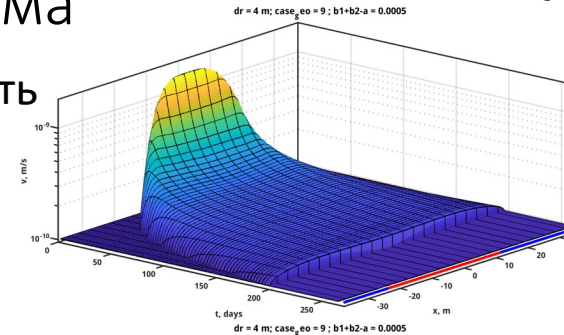
Профили вдоль полудлины для касательного напряжения и порового давления в конце расчета для различных значений нормальной жесткости и поровой проницаемости породы ( $\tau_0 = 1.8$  МПа):  
 а - непроницаемая порода, *b* - малопроницаемая порода.

Примеры динамики скорости скольжения и изменения касательного напряжения, вызванного деформацией разлома, вдоль длины разлома для разных случаев

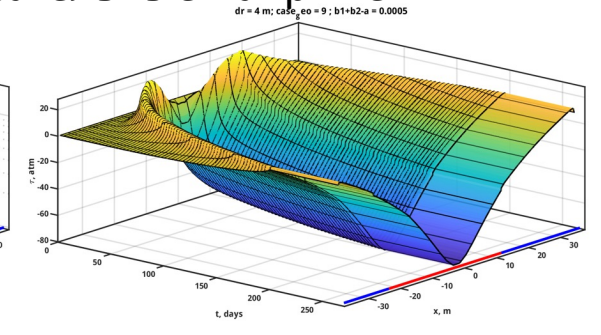
В. Ю. Рига, С. Б. Турунтаев. Моделирование индуцированной сейсмичности на основе двухпараметрического закона rate-and-state. // Физика Земли, 2021

## Касательные напряжения

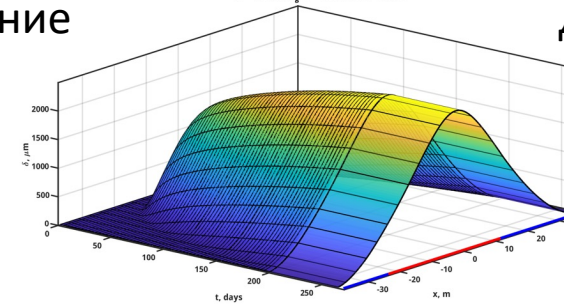
Скорость



Давление

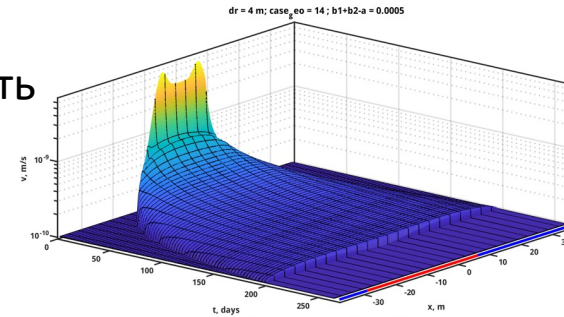


Смещение

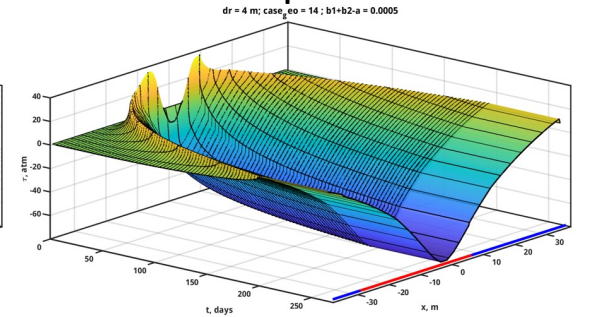


## Касательные напряжения

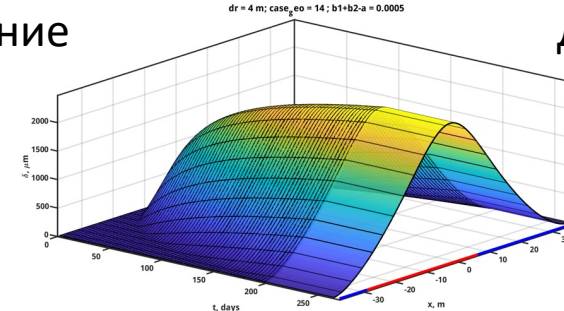
Скорость



Давление



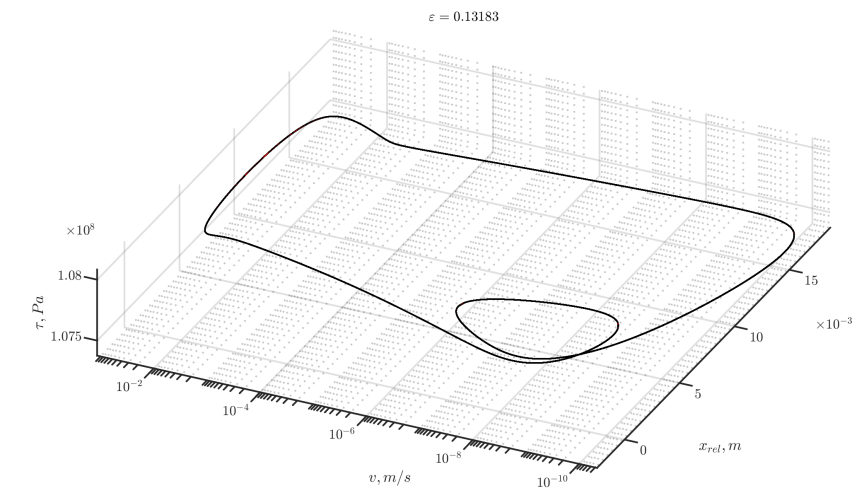
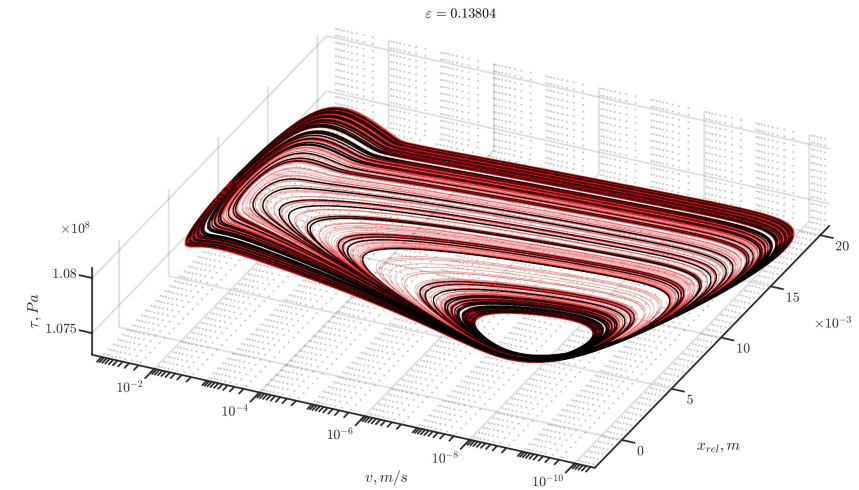
Смещение

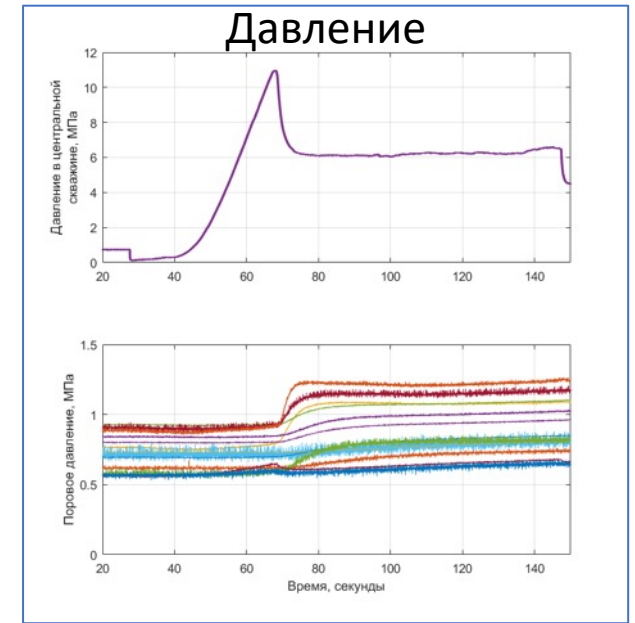
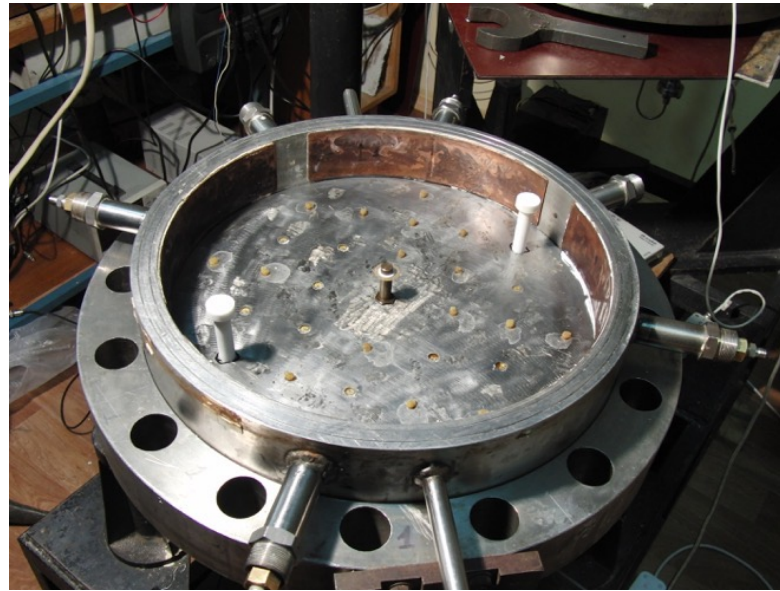
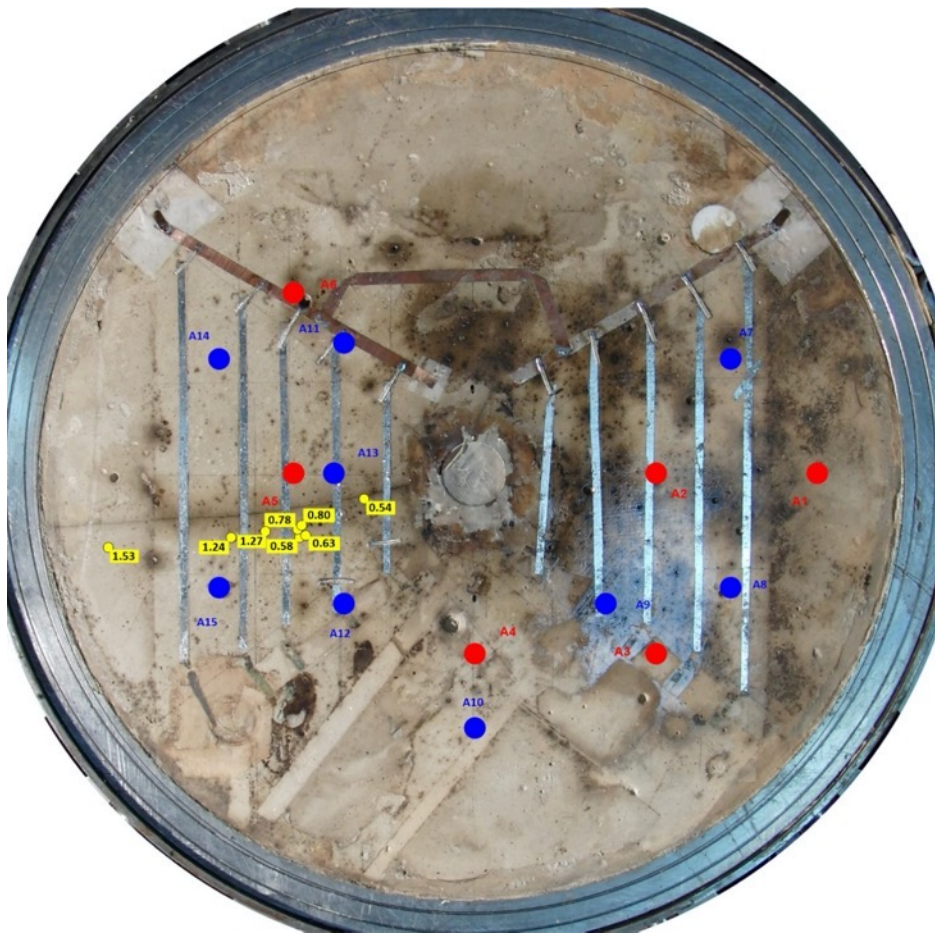




# Хаотизация при переходе к сейсмогенерирующему режиму скольжения

Показано, что определяющими параметрами, влияющими на параметры подвижки по разлому, являются величина расхода жидкости, расположение зоны разупрочнения на разломе по отношению к скважине, параметры закона трения. Последние играют ключевую роль в вопросе возможности возникновения сейсмического события.

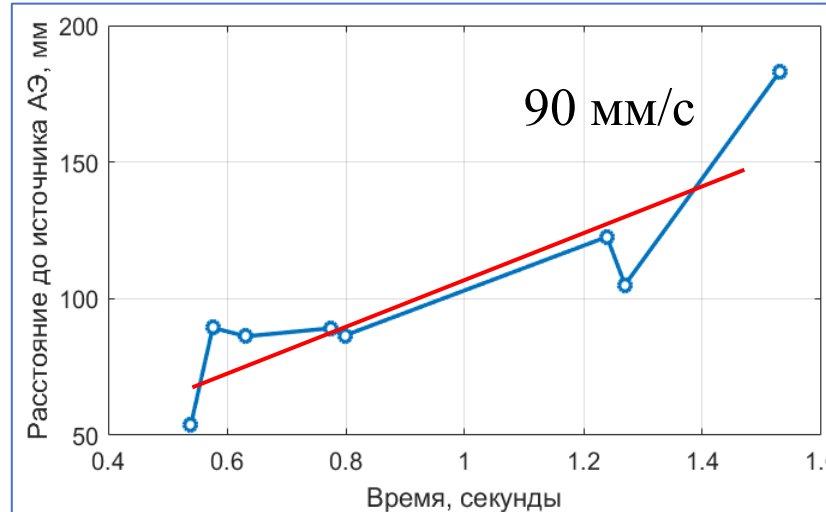
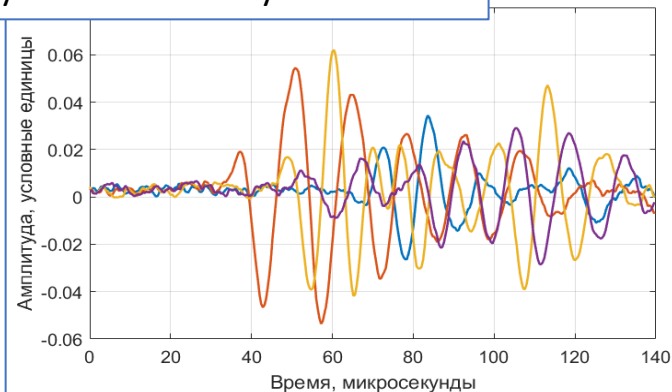




Образец насыщен водой, закачивается масло

#### Распространение акустических импульсов

Пример акустического импульса



*Turuntaev, SB; Zenchenko, EV; Zenchenko, PE; Triminova, MA; Baryshnikov, NA and Aigozhieva, AK. An influence of pore pressure gradient on hydraulic fracture propagation [online]. In: 9th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM9). Sydney: Engineers Australia, 2017: [712]-[723].*

# Образец насыщен маслом, закачивается масло

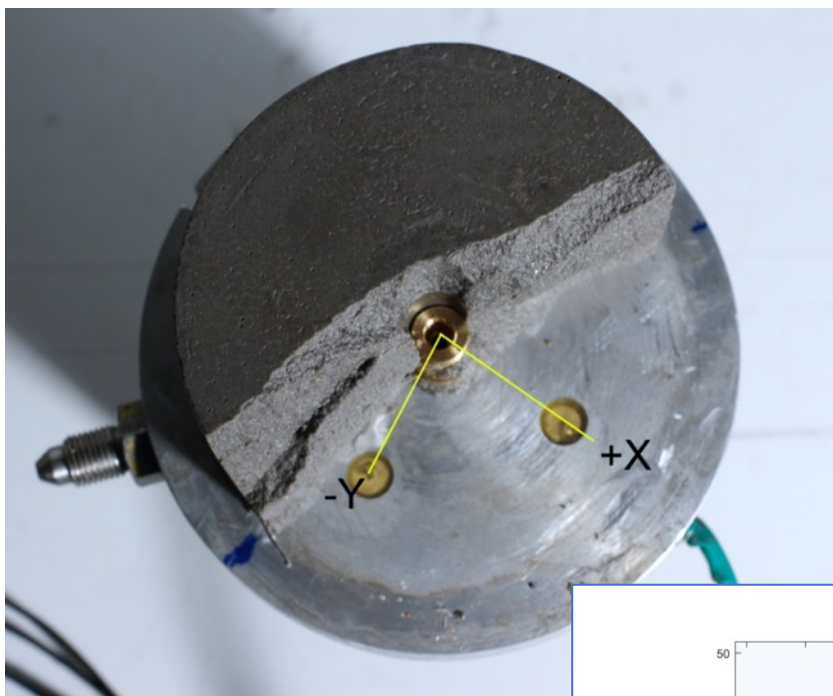
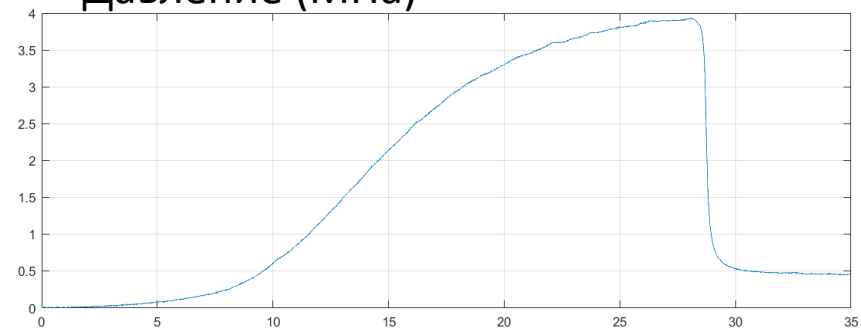
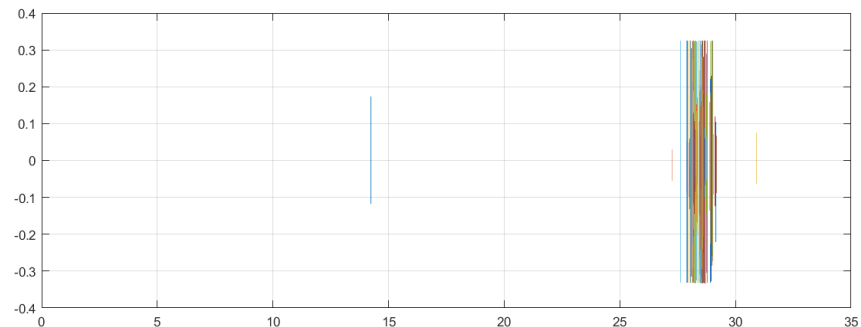


Фото образца после ГРП

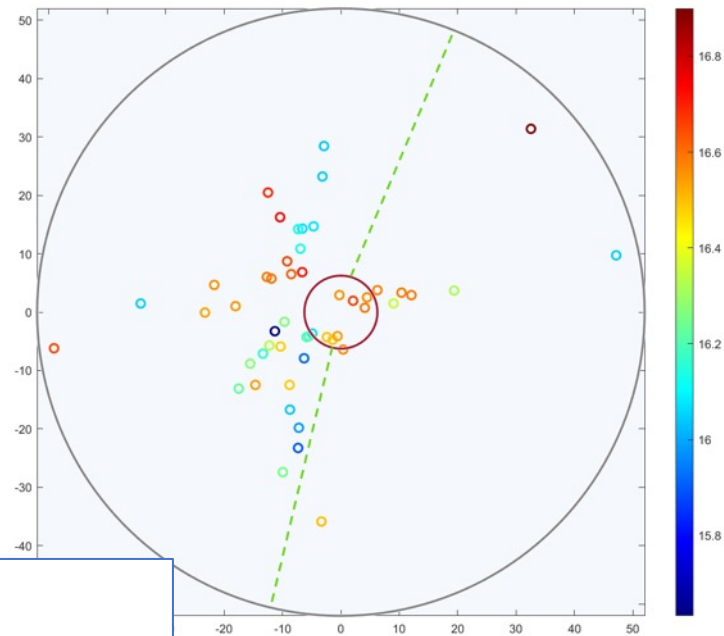
### Давление (МПа)



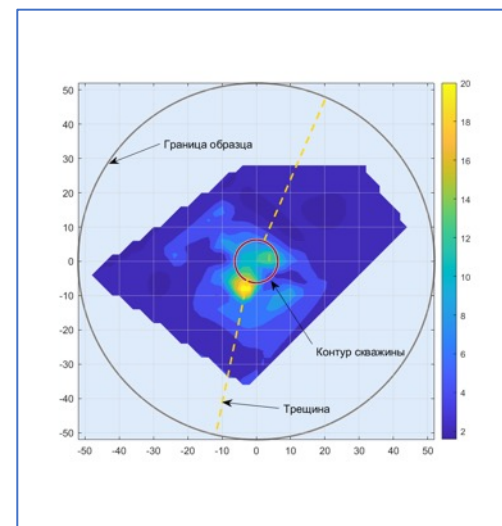
### Акустические импульсы (усл.ед)



### Время (сек)



Эпицентры акустических импульсов  
Цвет соответствует времени импульса



# Использование анализа микросейсмических событий для оценки проницаемости пласта

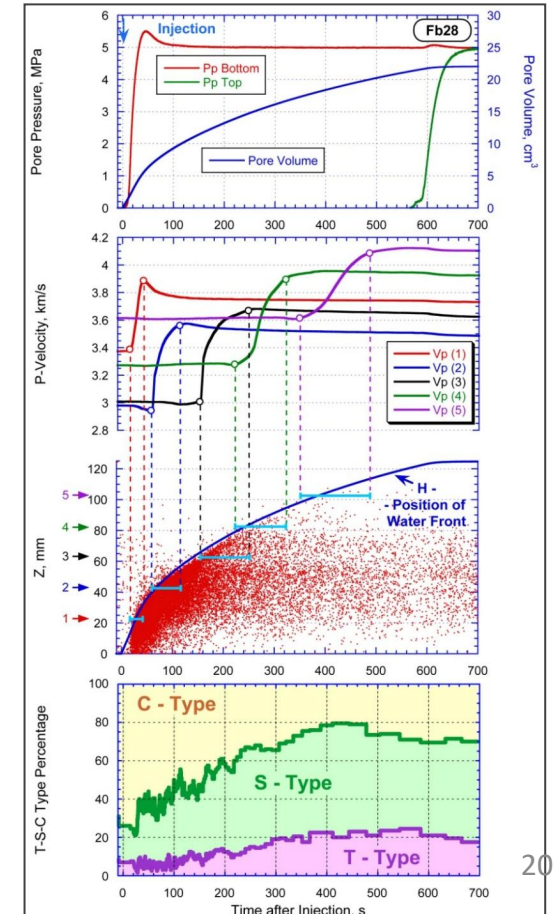
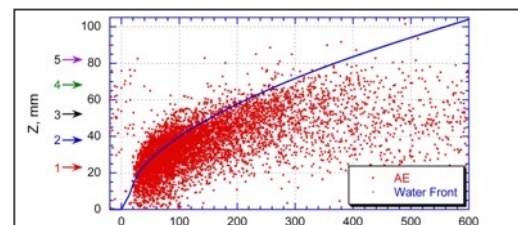
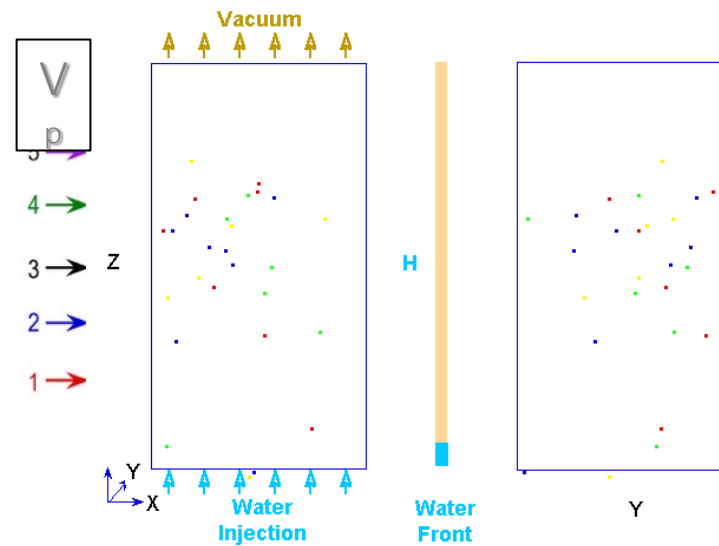
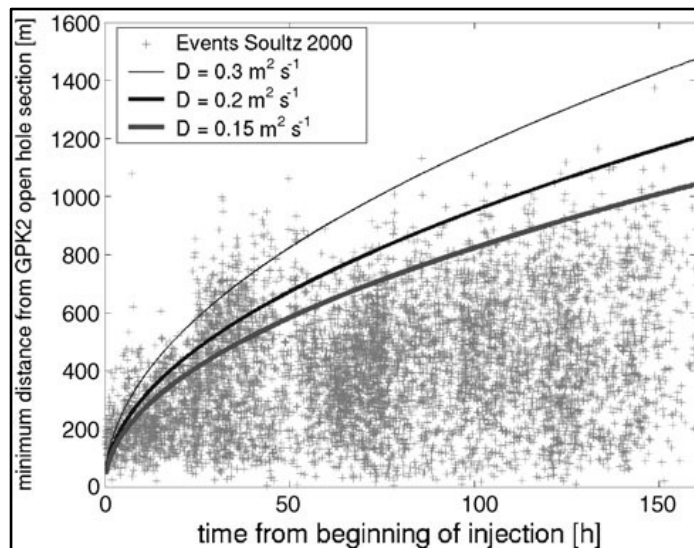
Уравнение пороупругости:  $\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(D\nabla p)$

Одномерное уравнение пороупругости:  $\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$   $\frac{\partial p}{\partial t} = D \nabla^2 p$

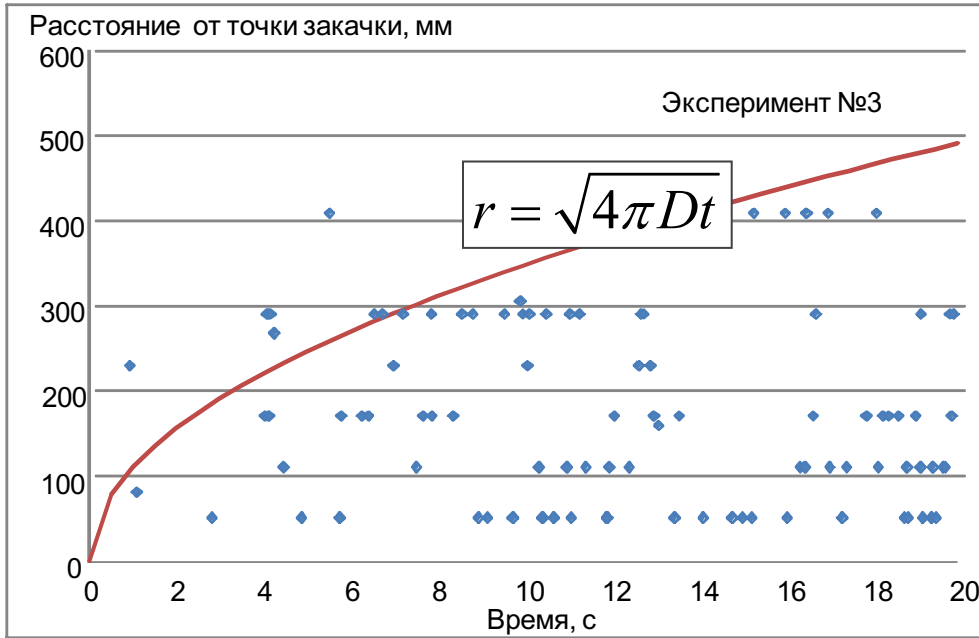
Решение для MC облака (Shapiro et.al):

$$r = \sqrt{4\pi Dt}$$

$$D = \frac{k}{\mu_0 \beta m_0}$$

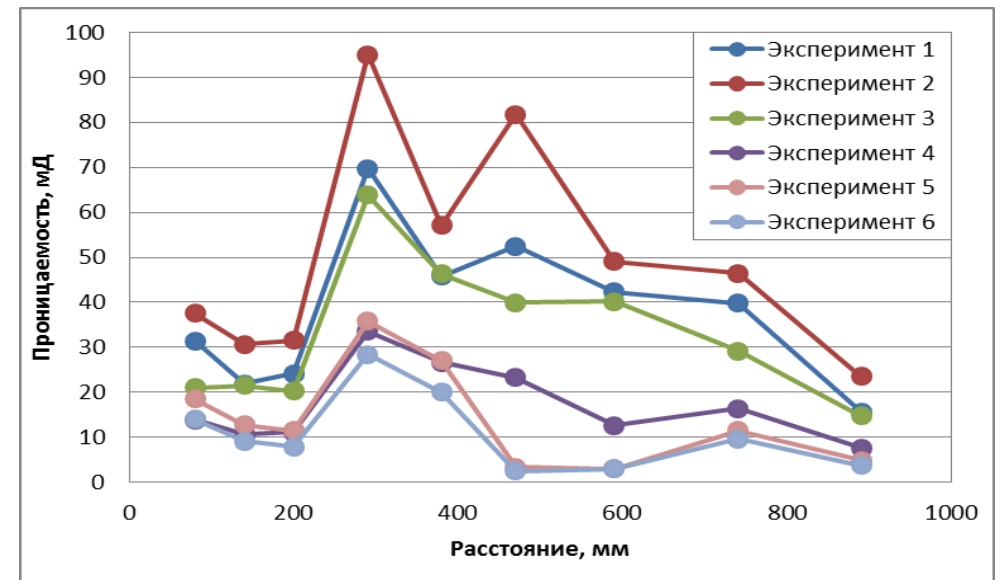
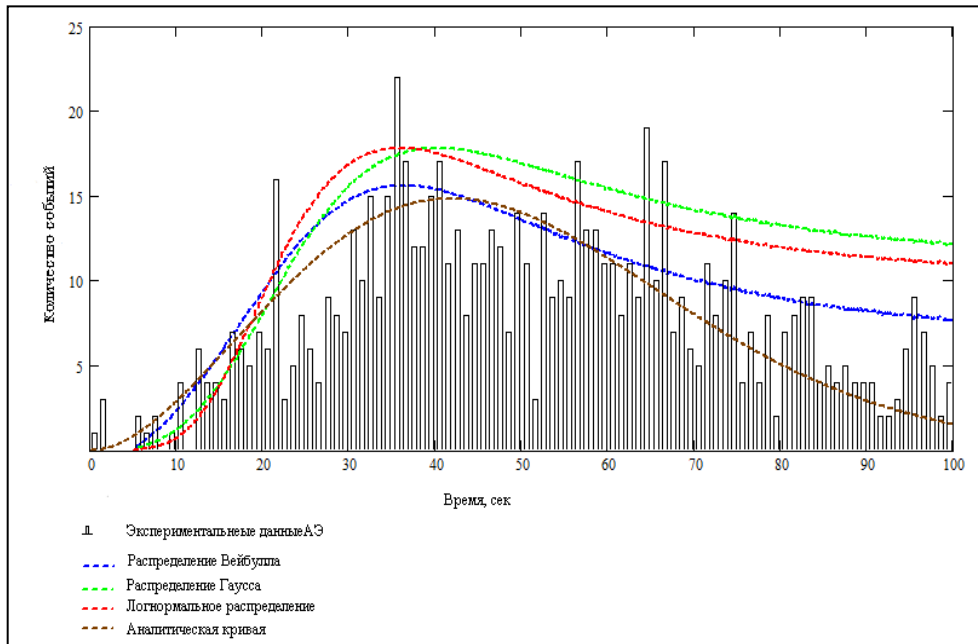
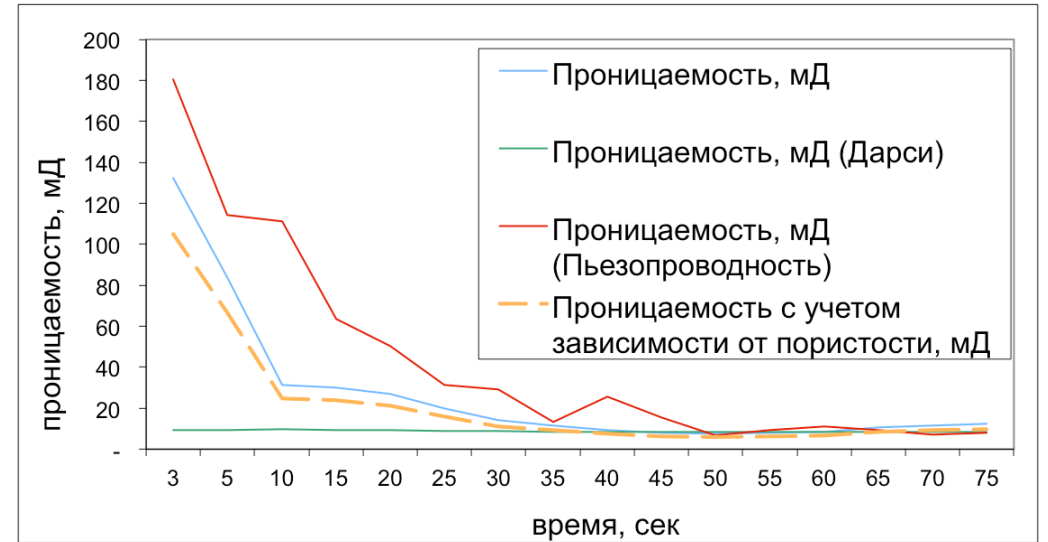


# Оценка проницаемости по распространению АЭ



$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\mu\beta m} \nabla^2 p$$

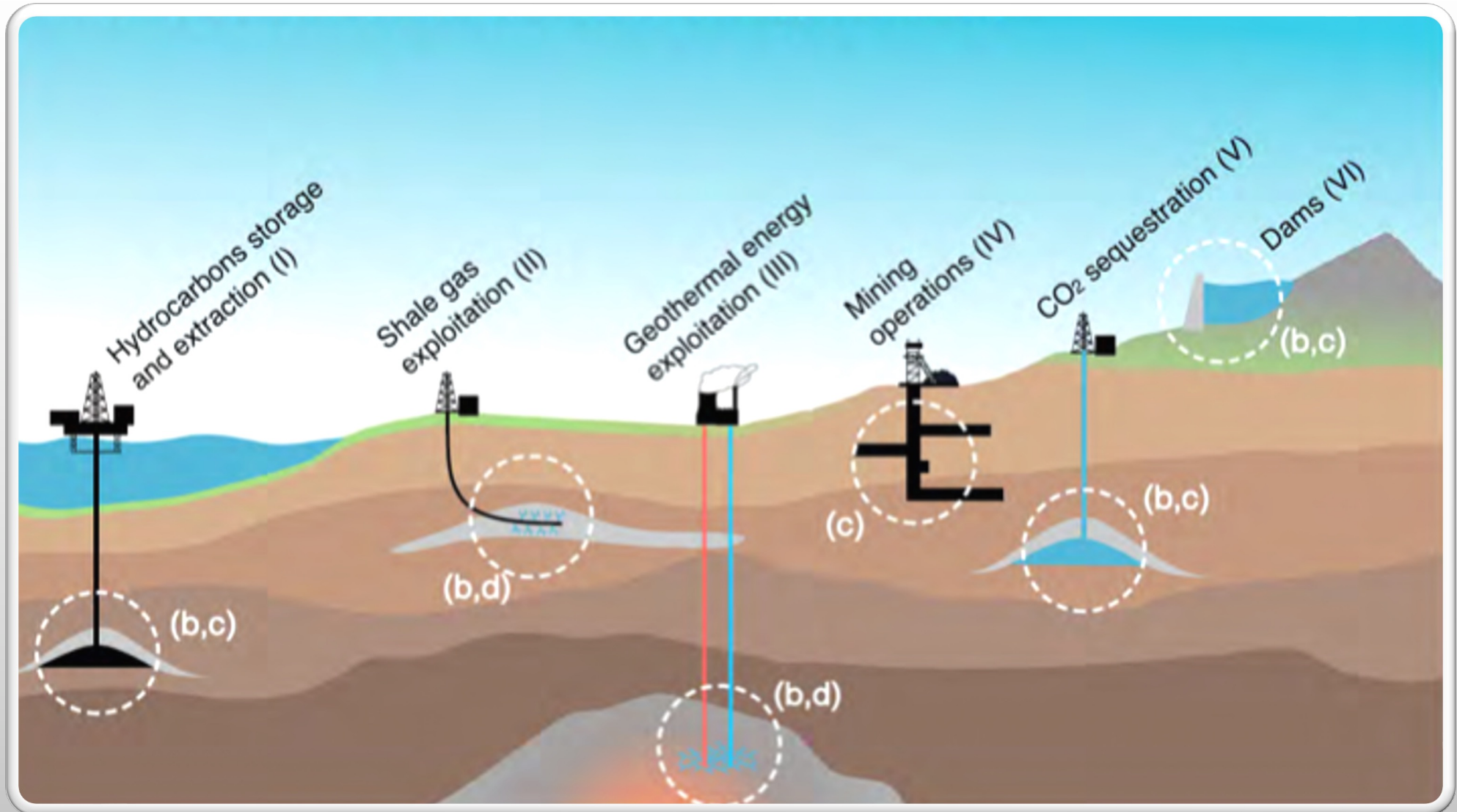
$$N(p^*) = ba^{-b} (p^*)^{b-1} e^{-\left(\frac{p^*}{a}\right)^b}$$



# Заключение

- Сейсмический/микросейсмический мониторинг является наиболее информативным средством изучения глубинных процессов при воздействии на флюидные системы
- Интерпретация данных мониторинга должна опираться на геомеханические модели движений пористой флюидонасыщенной трещиноватой среды
- Анализ пространственно-временной эволюции сейсмической активности позволяет решать как прямую задачу прогноза развития сейсмичности, положения ГРП, так и задачу оценки проницаемости среды
- Сложные системы требуют усложнения моделей
- Перспективными выглядит использование методов машинного обучения для выделения и анализа микросейсмических событий

# Воздействия на недра, приводящие к индуцированной и триггерной сейсмичности





СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!



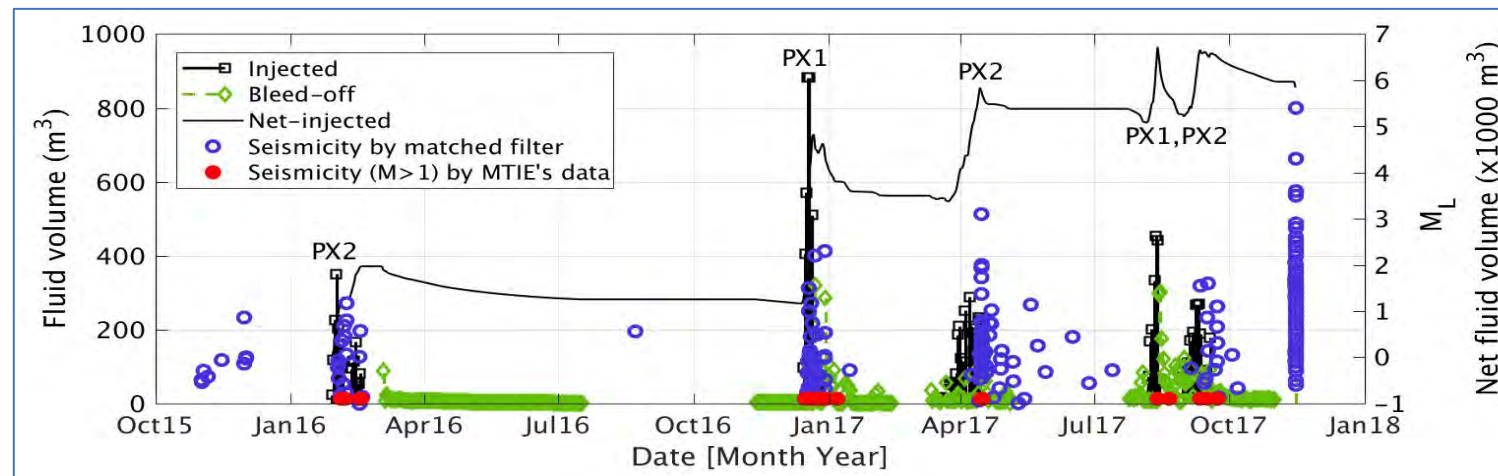
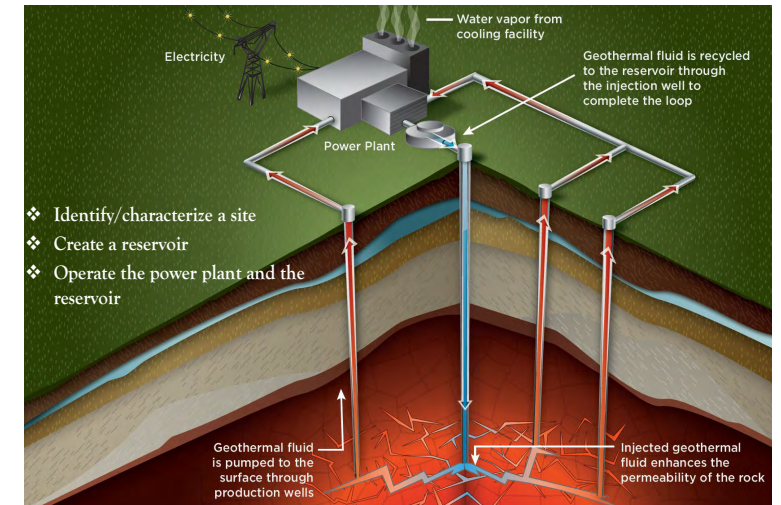
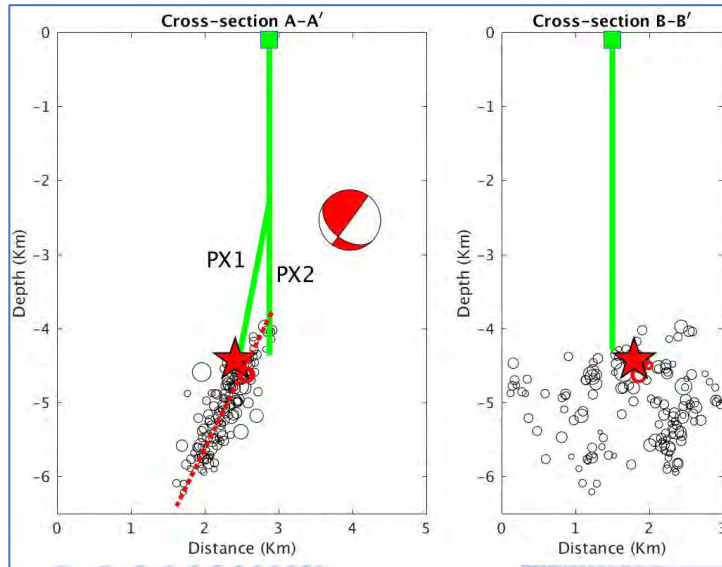
# Землетрясение M=5.4 Pohang, Южная Корея, 15.11.2017

135 потерпевших  
297 млн. долларов ущерб  
4.5 км глубина гипоцентра

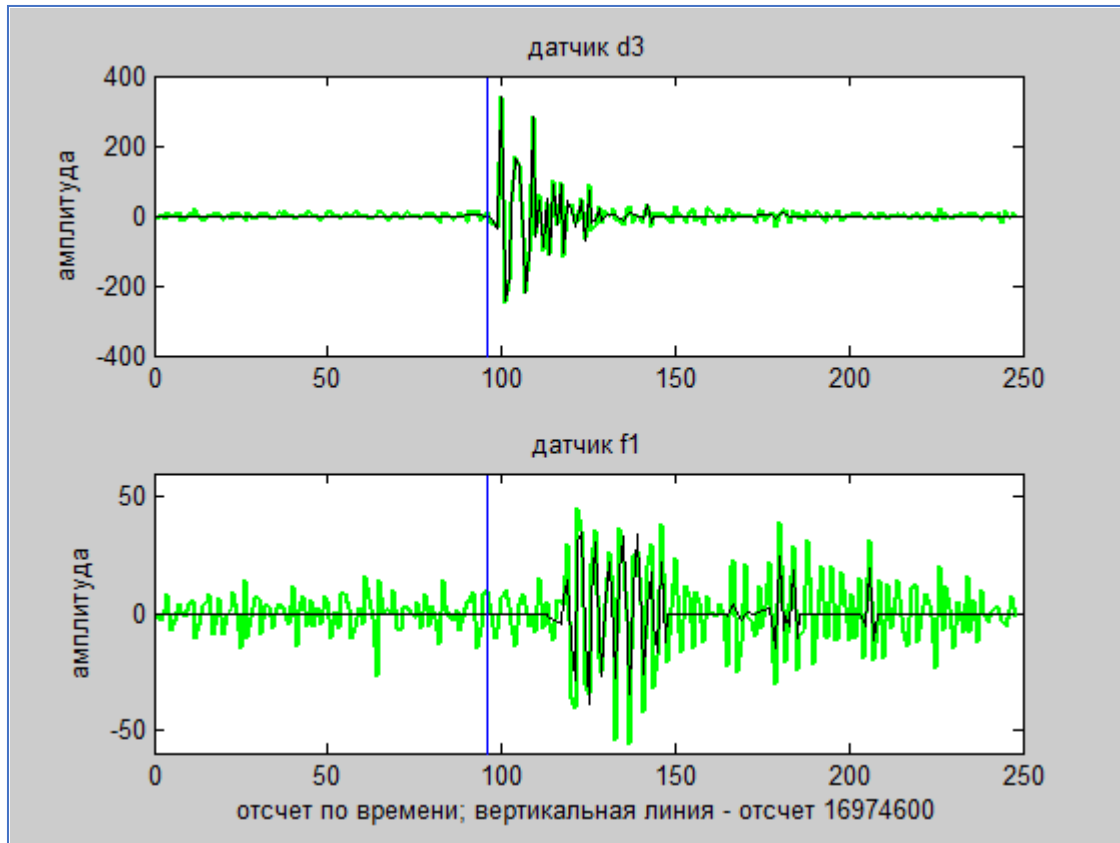


**Kwang-Hee Kim<sup>1\*</sup>, Jin-Han Ree<sup>2\*</sup>, YoungHee Kim<sup>3</sup>,  
Sunghil Kim<sup>2</sup>, Su Young Kang<sup>1</sup>, Wooseok Seo<sup>1</sup>**

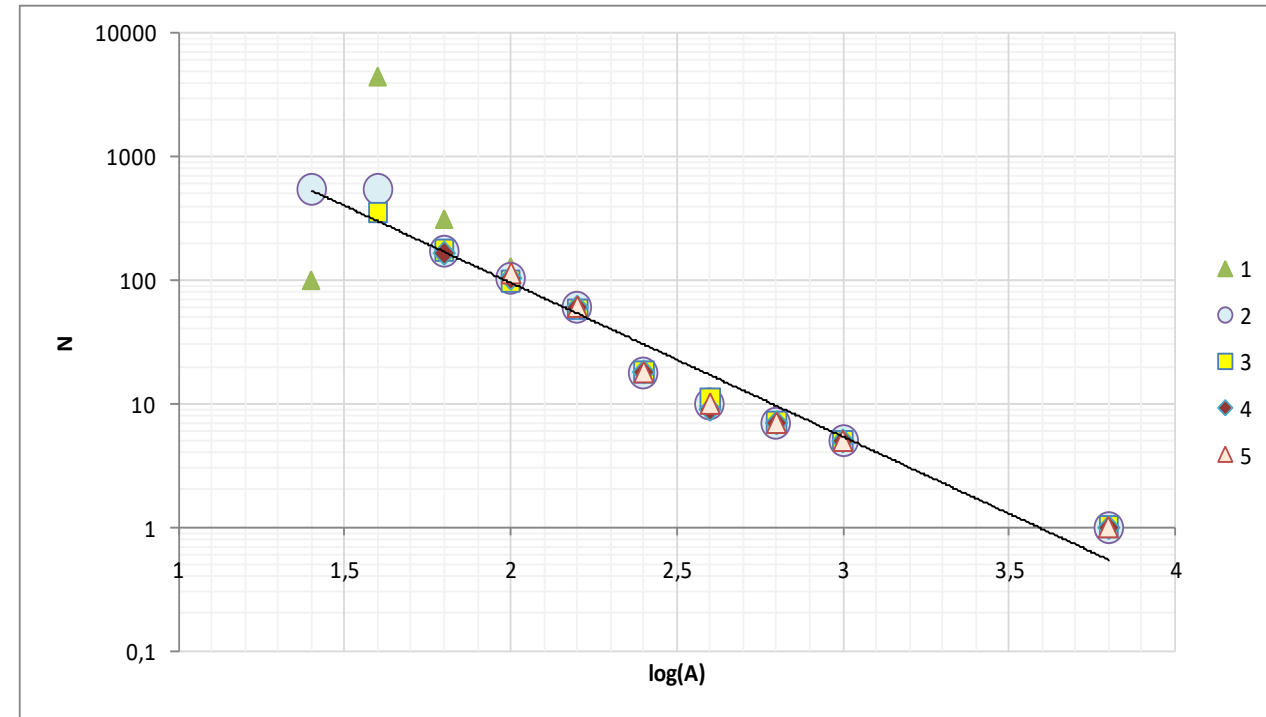
<sup>1</sup>Pusan National University  
<sup>2</sup>Korea University  
<sup>3</sup>Seoul National University



# Использование вейвлет-анализа для выделения сейсмических (акустических) импульсов

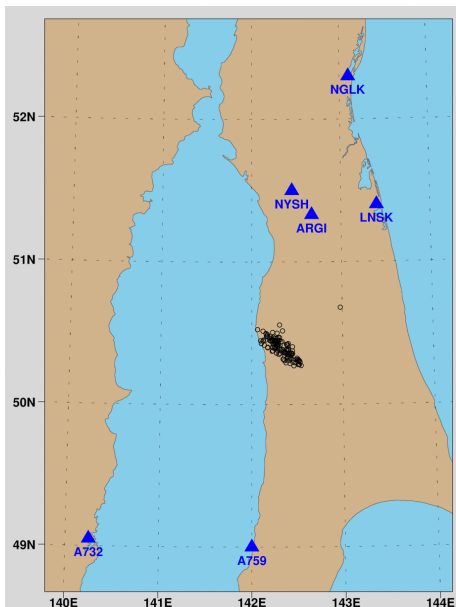


Запись импульса АЭ двумя датчиками. Черная линия - отфильтрованный вейвлетами импульс, зеленая – исходная запись.

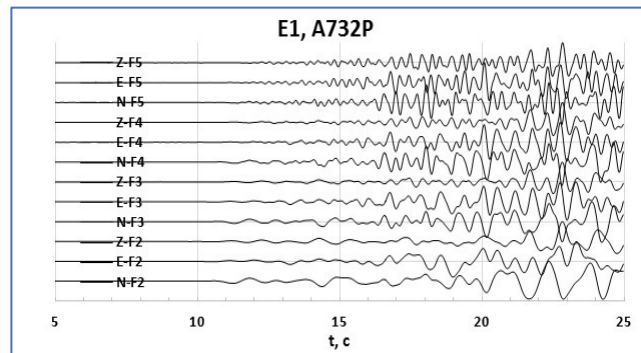


Графики повторяемости для импульсов, выделенных пороговыми критериями и вейвлет-анализом: 1 – вейвлет-фильтрация по 500 000 отсчетам; 2 – вейвлет-фильтрация по 2 млн отсчетов; 3 – вейвлет-фильтрация по 4 млн отсчетов; 4 – порог  $5\sigma$ ; 5 – порог  $8\sigma$

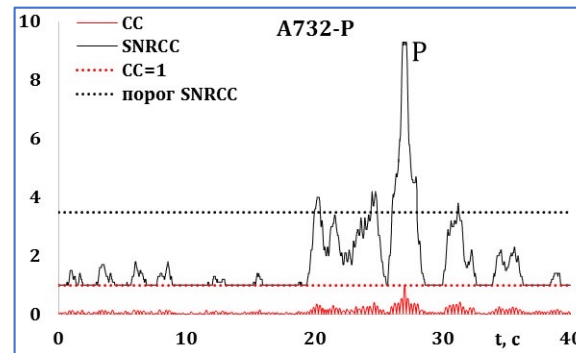
# Использование кросскорреляции волновых форм для восстановления афтершоковой последовательности землетрясения на о-ве Сахалин



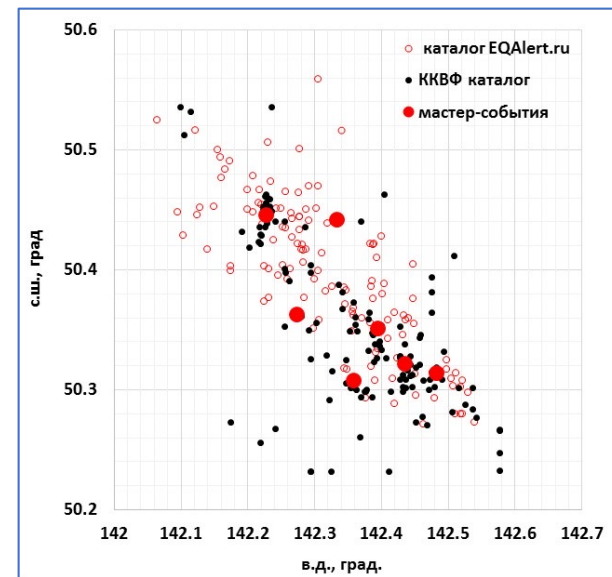
Относительное положение 6 ближайших сейсмических станций и области афтершоковой активности



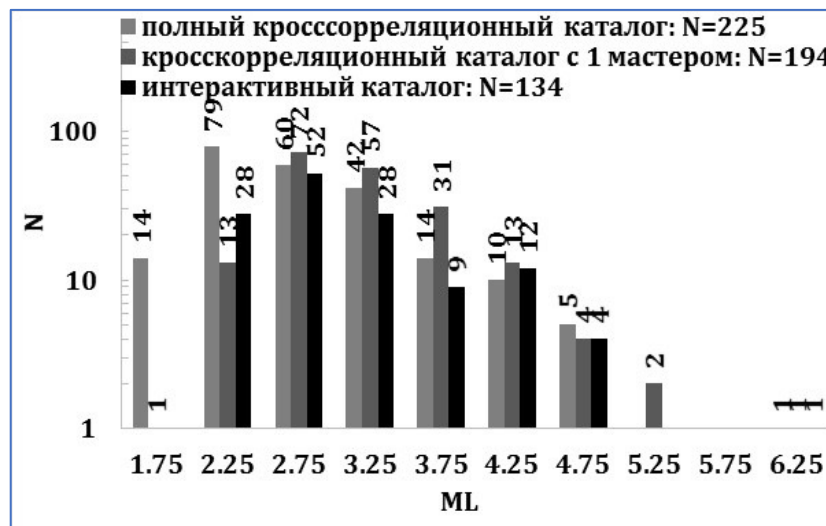
Шаблоны волновых форм фаз P и S от главного события



Пример детектирования сигналов с помощью кросскорреляции



Расположение 133 событий из исходного каталога и 170 событий из кросскорреляционного каталога



Графики повторяемости

И.О. Китов, С.Б. Турунтаев, А.В. Коновалов, А.А. Степнов В.В. Пупатенко. Использование кросс-корреляции волновых форм для восстановления афтершоковой последовательности землетрясения 14 августа 2016 года на о. Сахалин». // Сейсмические приборы, 2019. Т. 55, No 1. С.59–80. <https://doi.org/10.21455/si2019.1-4>