

Сейсмичность при разработке месторождений углеводородов и реализации проектов альтернативной энергетики.

С.Б. Турунтаев

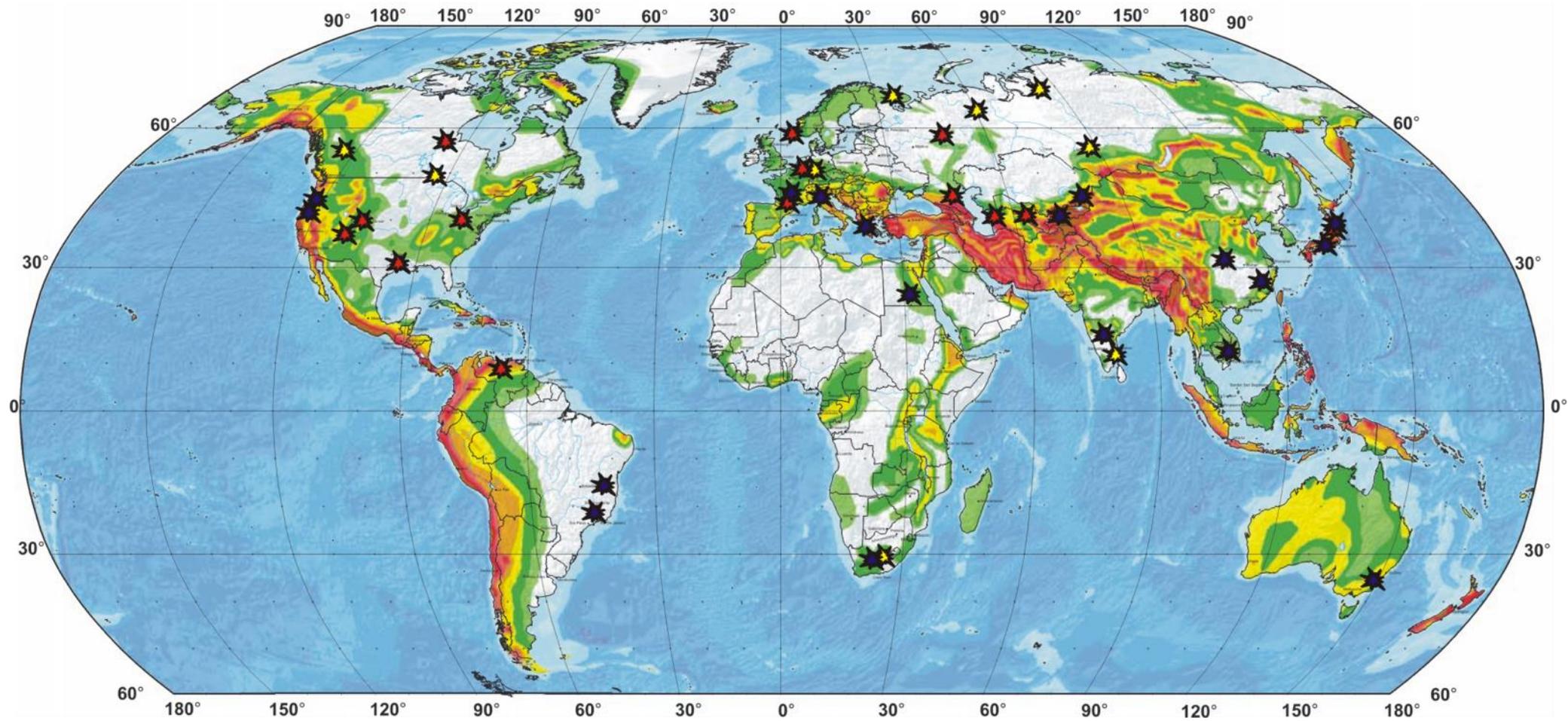
Д.ф.-м.н.

ИДГ РАН



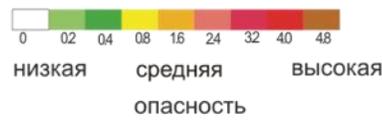
Содержание

- Примеры сейсмичности при воздействии на флюидные системы
- Физика сейсмичности, индуцированной закачкой флюидов
- Активация естественных разломов и трещин при изменении пластового давления. Закон трения rate-and-state
- Примеры расчетов подвижек по разломам и трещинам
- Дискриминация индуцированной и естественной сейсмичности
- Заключение



Проекция Робинсона
 Масштаб: 1:35,000,000 на экваторе
 500 0 500 1000 1500 2000 2500 км

Пиковые ускорения земной поверхности (m/s²)
 при 10% вероятности превышения за 50 лет, 500-летний период повторяемости



Техногенные землетрясения, вызванные:

-  - разработкой месторождений углеводородов и закачкой жидкости
-  - разработкой месторождений полезных ископаемых
-  - заполнением водохранилищ

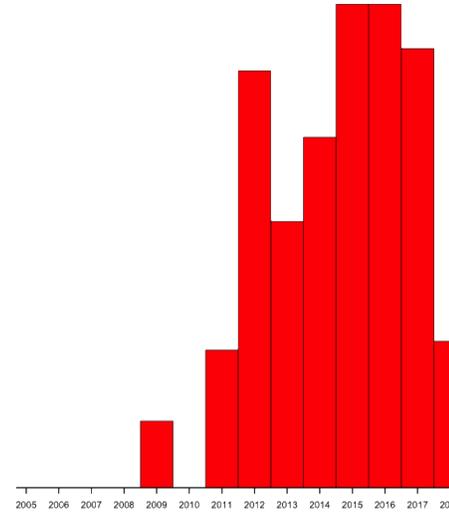
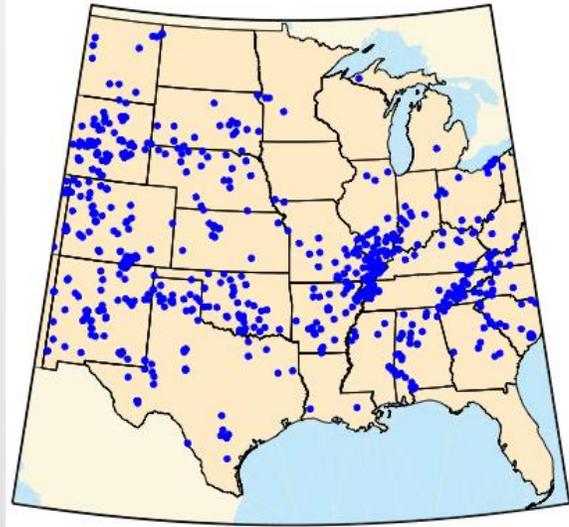
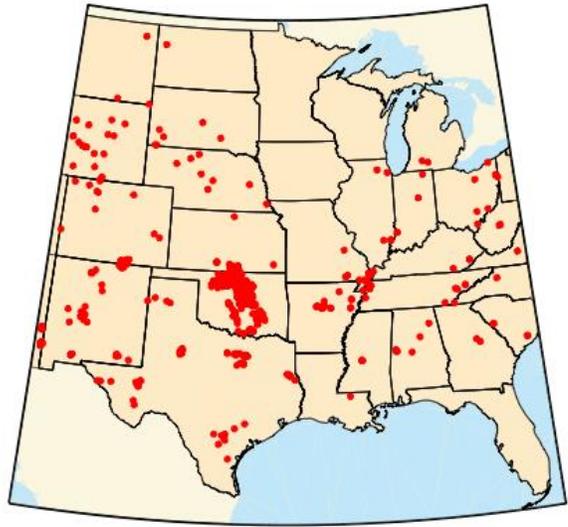
Денверские землетрясения



Усиление сейсмической активности при разработке сланцевых месторождений нефти, США

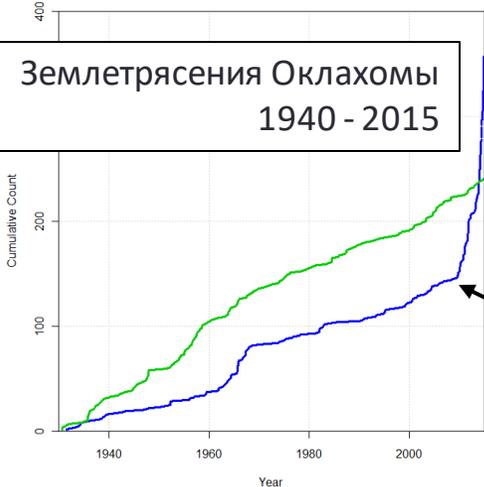
2009-2015 361 $M \geq 3$ /год

1973-2008 24 $M \geq 3$ /год



Наиболее ярким примером сейсмических проявлений, спровоцированных закачкой, стало землетрясение с магнитудой M_w 5.8, произошедшее в начале сентября 2016 г. в штате Оклахома (США) и вызвавшее многочисленные повреждения зданий (Grandin et al., 2017). Исследование показало (Zhai et al., 2019), что рост сейсмичности в штате Оклахома связан с накопленным объемом закачанной жидкости. Сейсмическая активность в центральной Оклахоме проявилась почти через 15 лет после начала закачки. В западной части Оклахомы такая активизация началась после резкого увеличения темпов закачки. 5

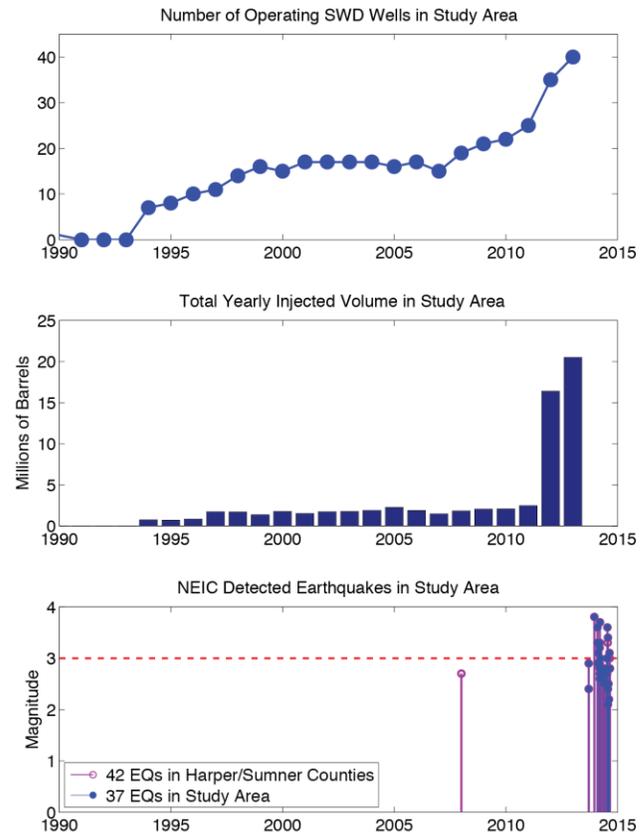
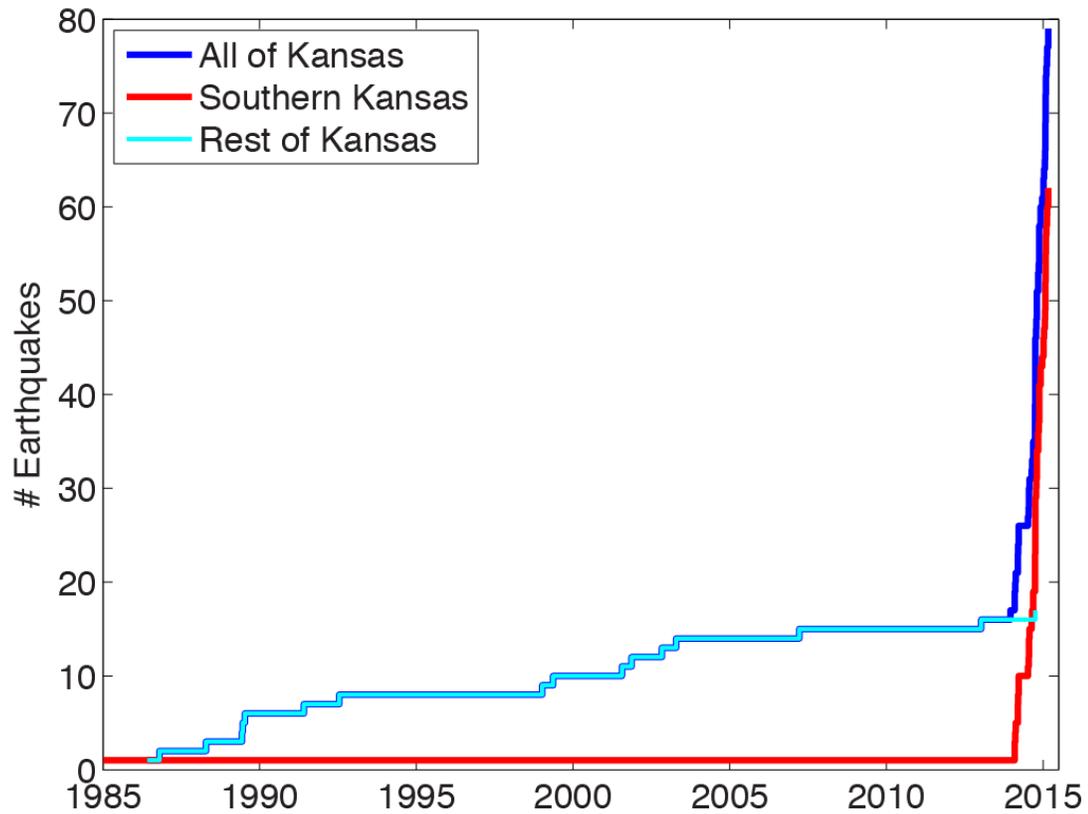
Землетрясения Оклахомы
1940 - 2015



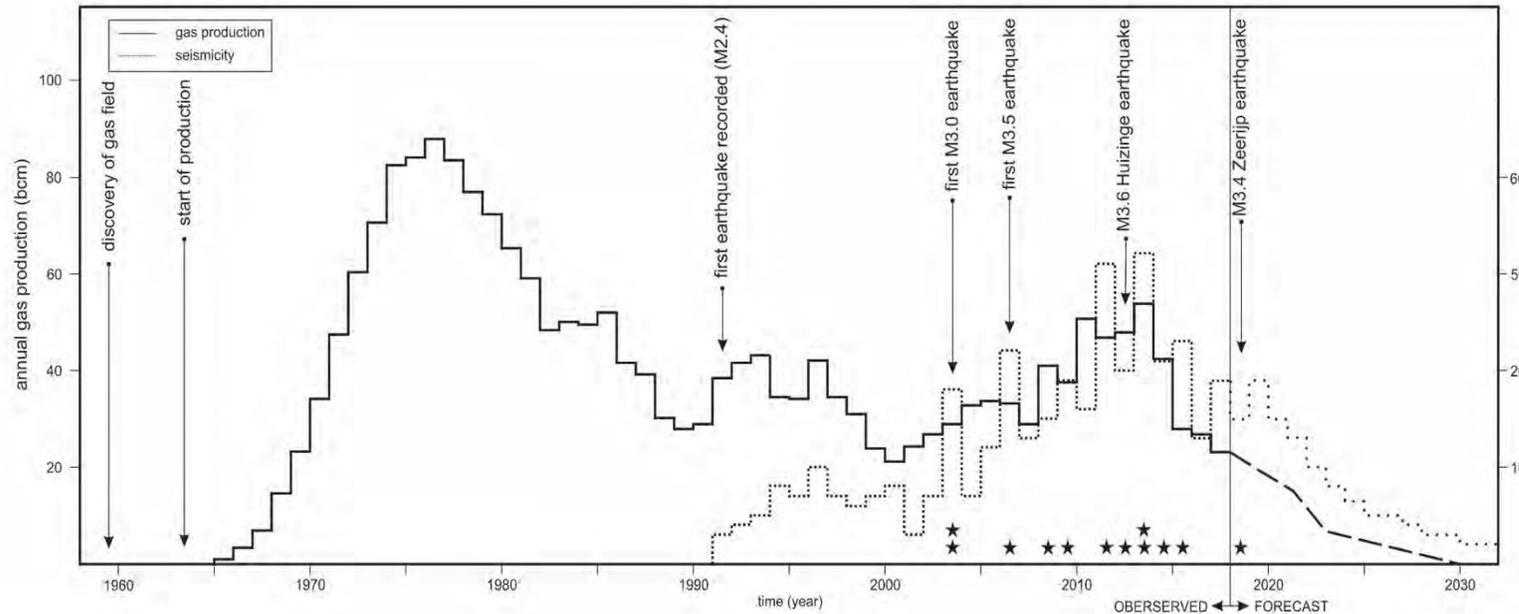
William L. Ellsworth et al.
Stanford Centre for Induced and Triggered Seismicity

Рост сейсмичности в результате разработки сланцевых месторождений

Сейсмичность Канзаса



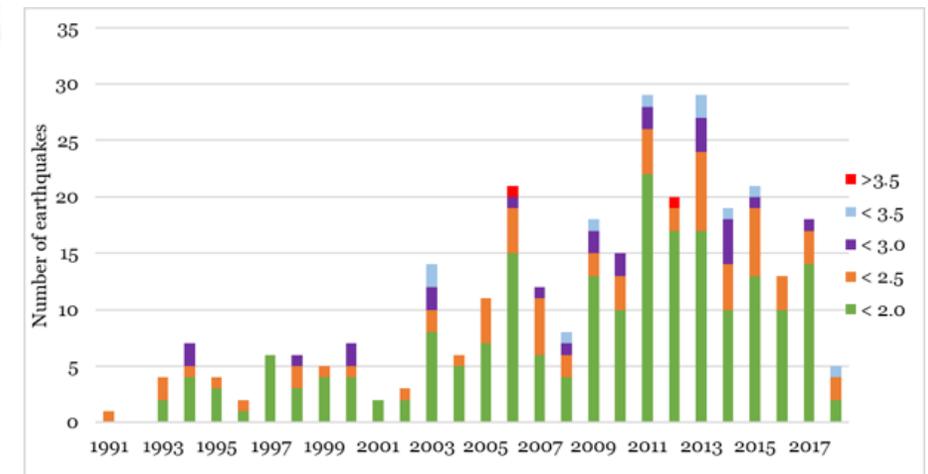
Добыча газа и сейсмичность месторождения Гронинген, Нидерланды



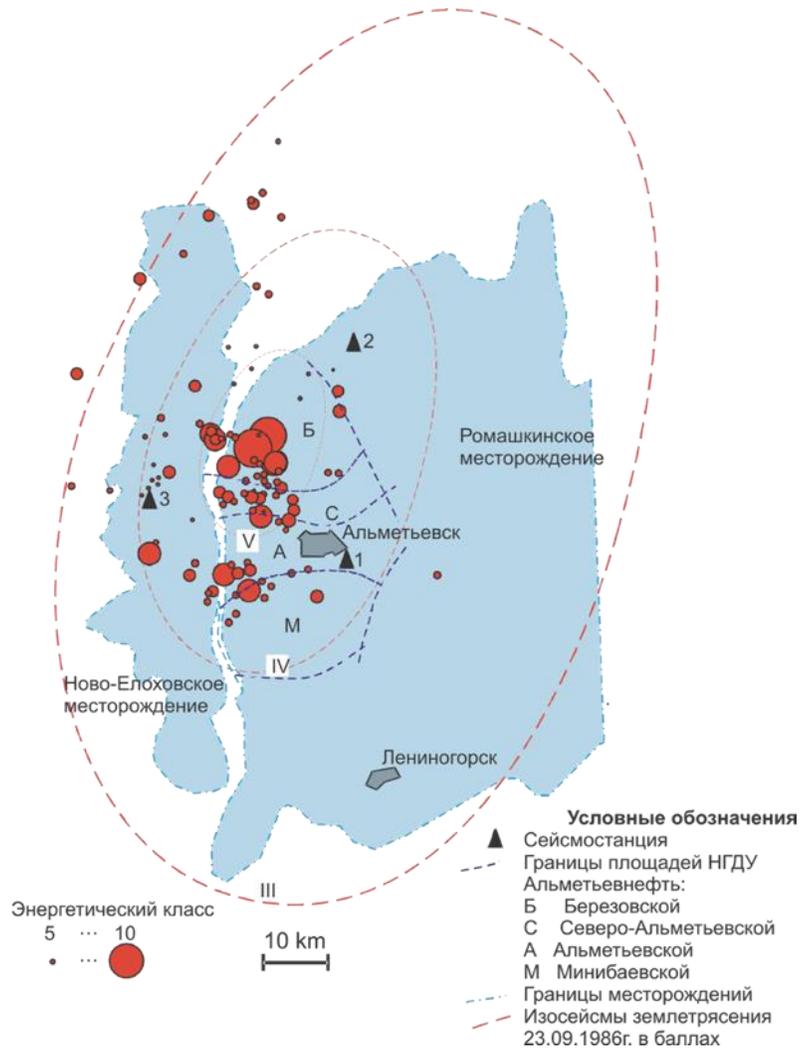
Sintubin 2018

В Нидерландах утром 1 октября 2023г прекратили добычу на Гронингенском газовом месторождении, которое является крупнейшим в Евросоюзе (De Telegraaf)

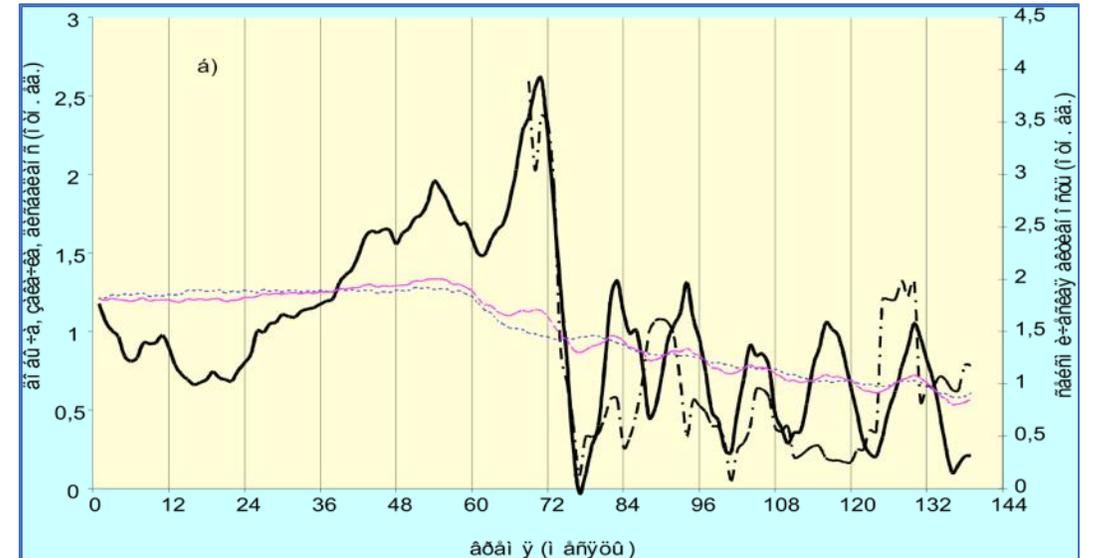
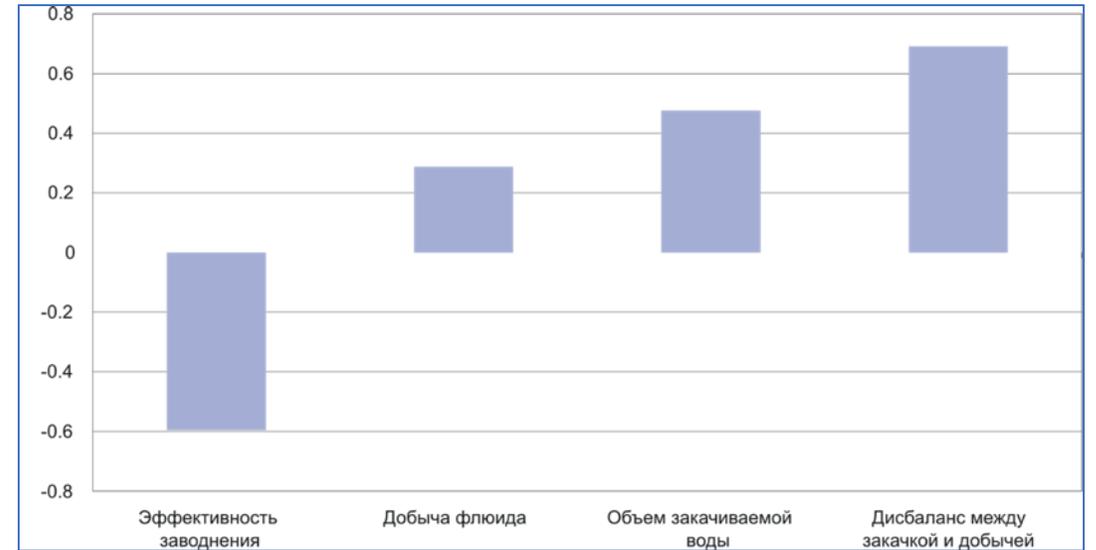
Месторождение было открыто в 1959 году на севере Нидерландов. С тех пор было добыто свыше 1,5 трлн куб. м, а остаточные запасы оцениваются в 2,7 трлн куб. м. С начала 1990-х район месторождения пережил более 900 землетрясений магнитудой до 3,6.



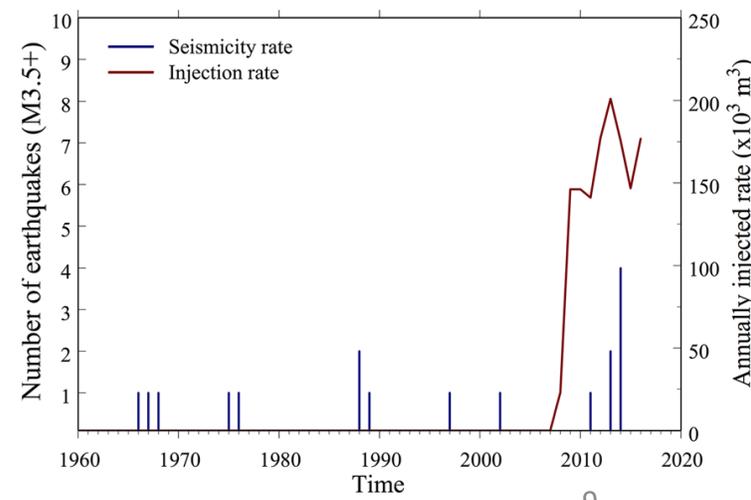
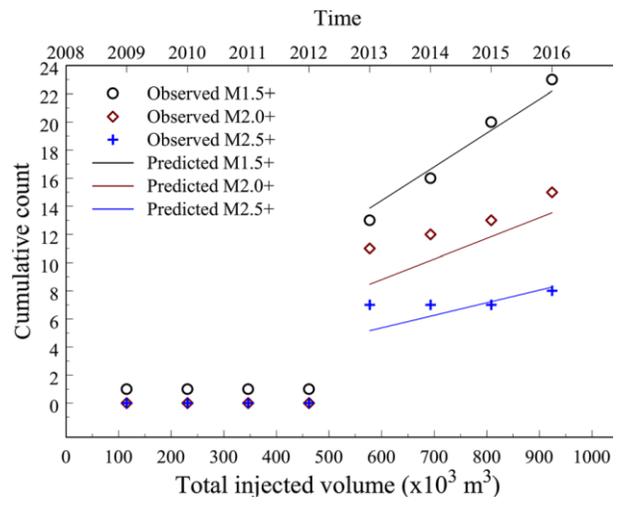
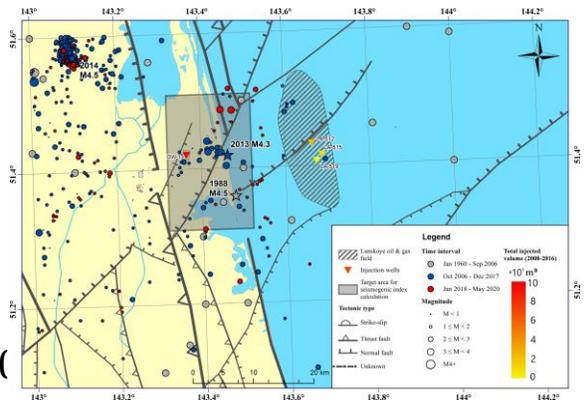
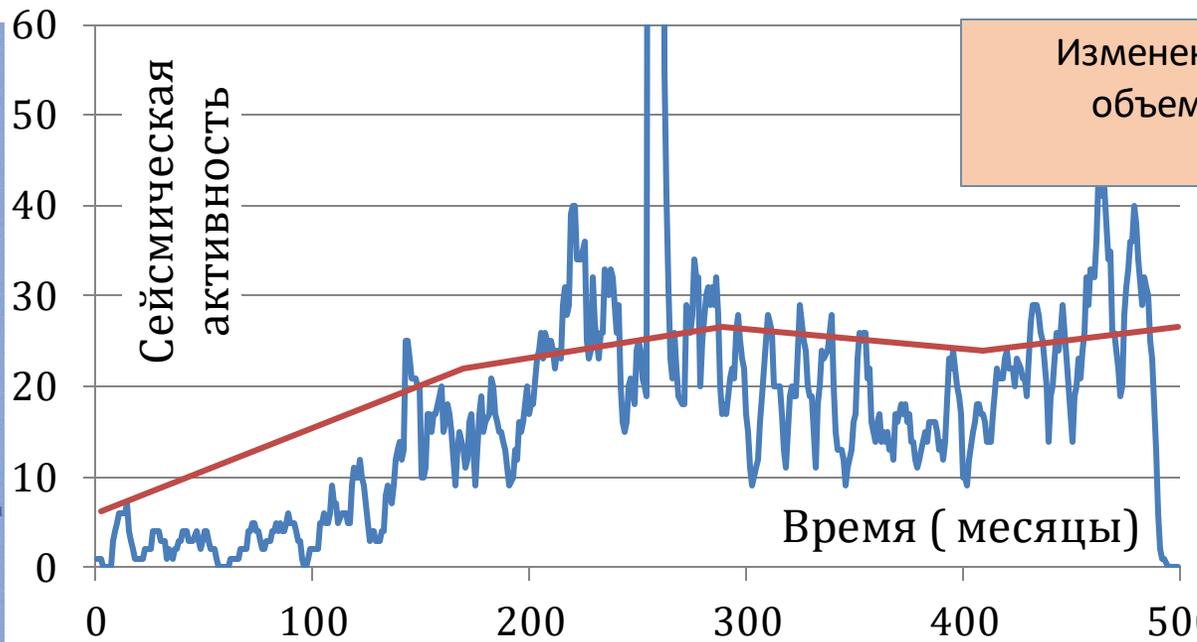
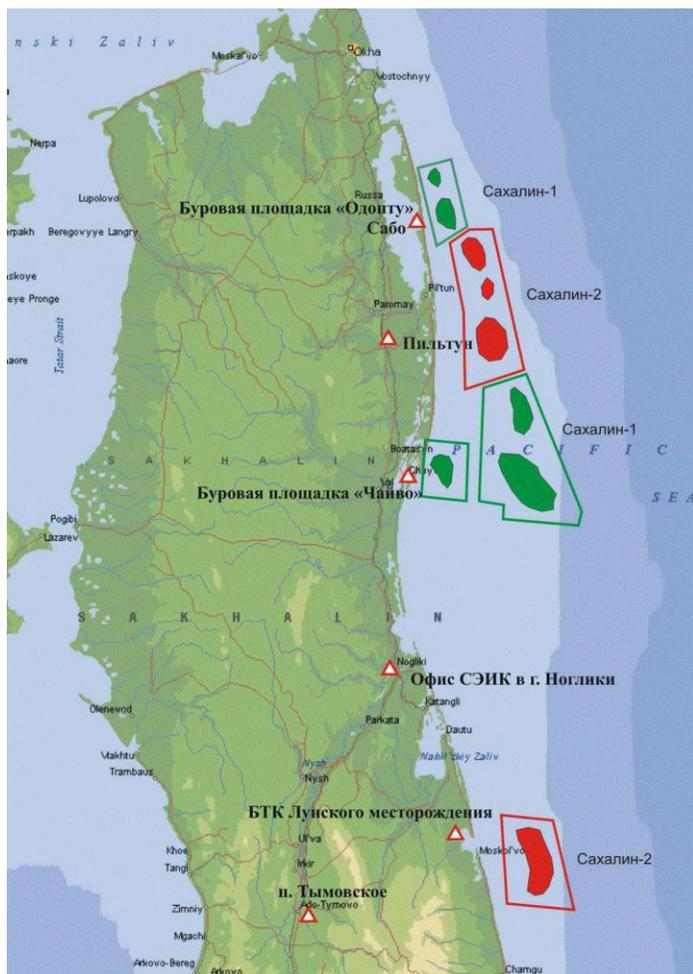
- Усиление техногенной сейсмичности вызывается дисбалансом между объемами закачанной и добытой жидкостями.
- Рост техногенной сейсмической активности ведет к падению эффективности мер по увеличению нефтеотдачи



Сейсмичность Ромашкинского месторождения нефти

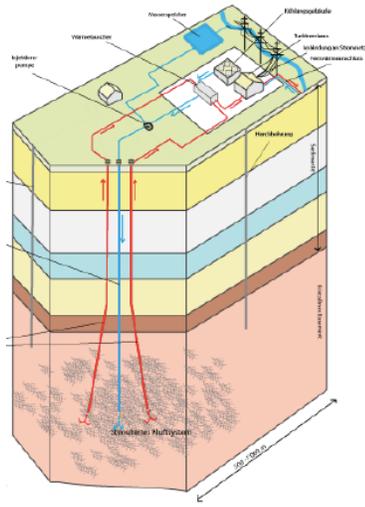


Сейсмичность в районе месторождений углеводородов шельфа о-ва Сахалин.

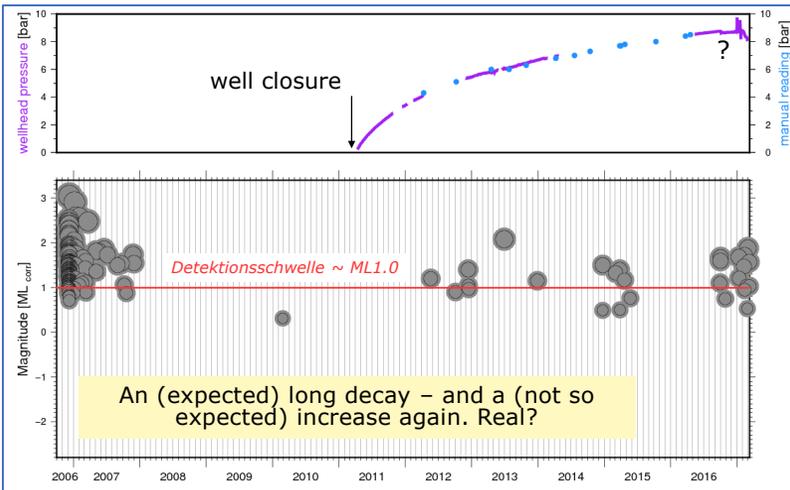
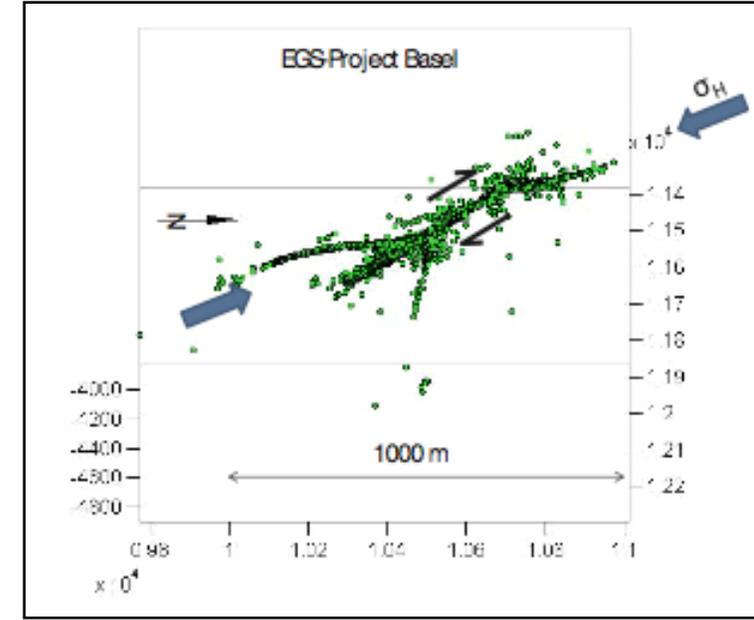
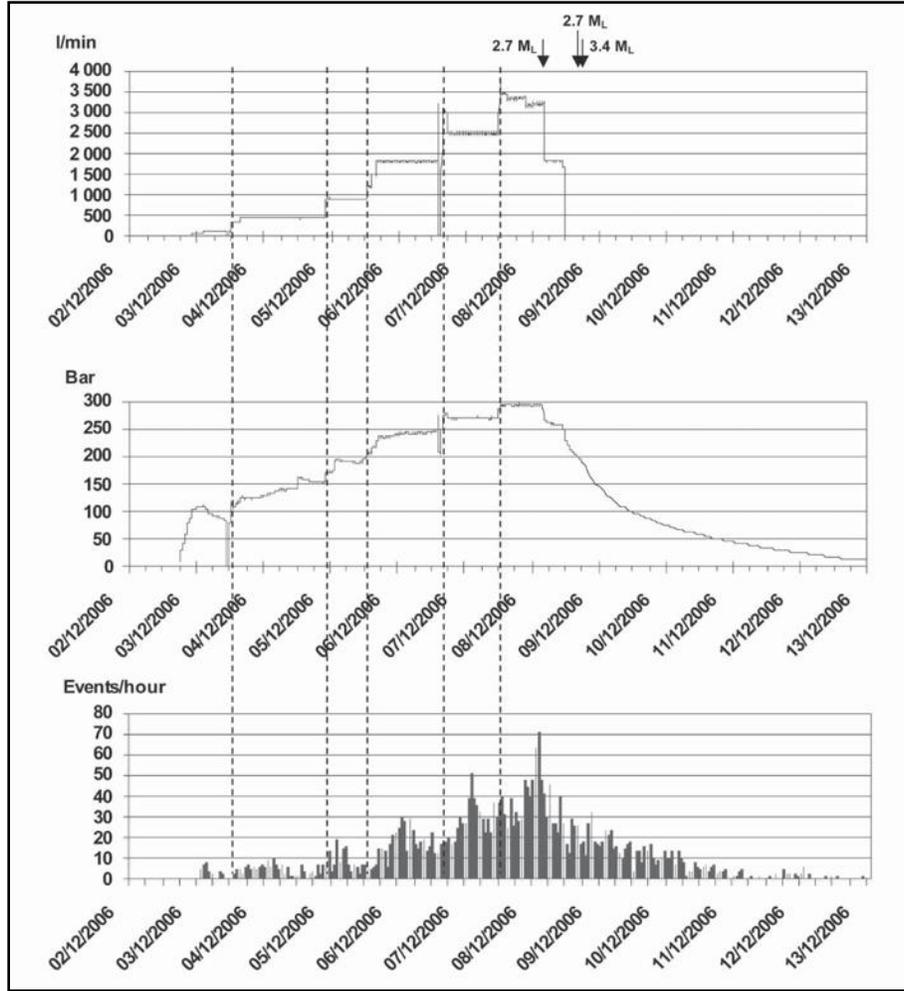


Konovalov, A.V., Stepnov, A.A. & Turuntaev, S.B. *Pure Appl. Geophys.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03006-y>

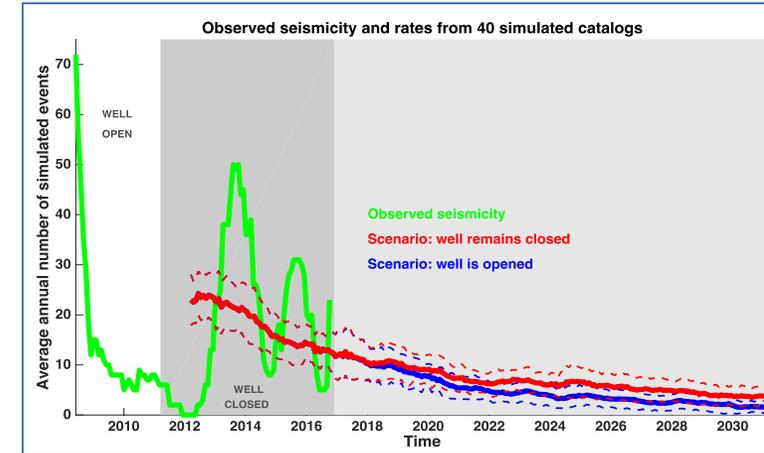
Базельский геотермальный проект



Basel (2006)
(EGS)



Stefan Wiemer, Induced seismicity workshop, Davos, 2017



Геотермальный проект в Сент Галлене, Швейцария

2007 – Принимается энергетическая стратегия 2020

2009 – Изучение реализуемости геотермического проекта

2010 – 3D сеймика (270 km²)

– жители St. Gallen голосуют за предоставление 150M\$

→ 82% «за»

2012 – начало сейсмического мониторинга

2013 – март: начало бурения

– июль: проведение ГРП

→ землетрясение ML3.5

– август: городской парламент решает продолжить.

Жители в целом поддерживают.

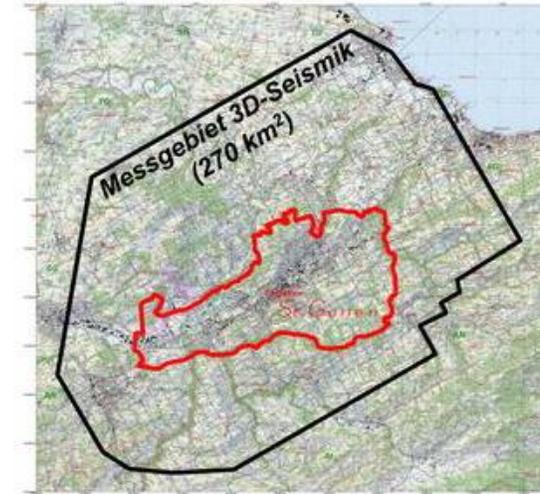
– октябрь: опробование откачки

→ сейсмичность прекращается

– ноябрь: консервация скважин

2014 – май: геотермальный проект остановлен

2015/16 – пробная добыча газа и решение о будущем проекта

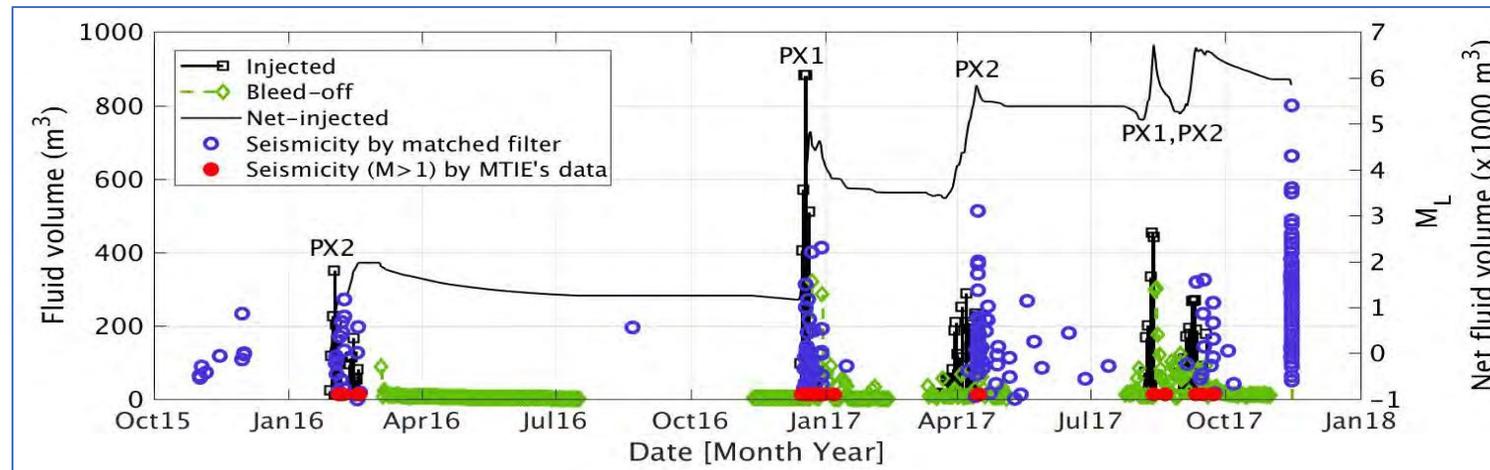
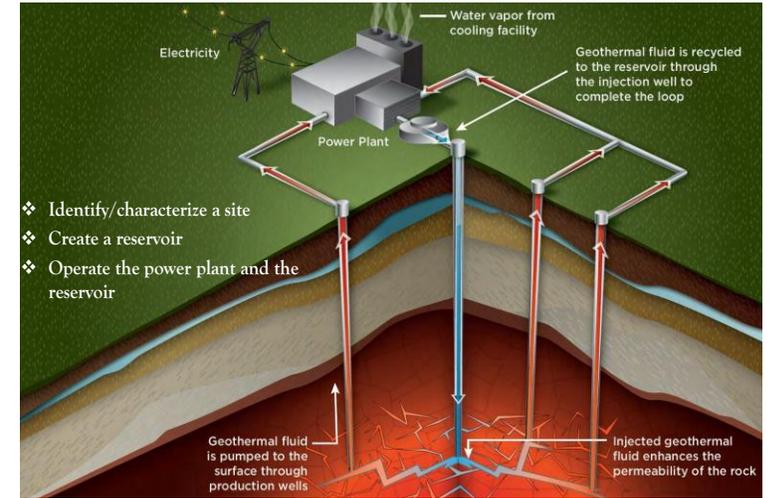
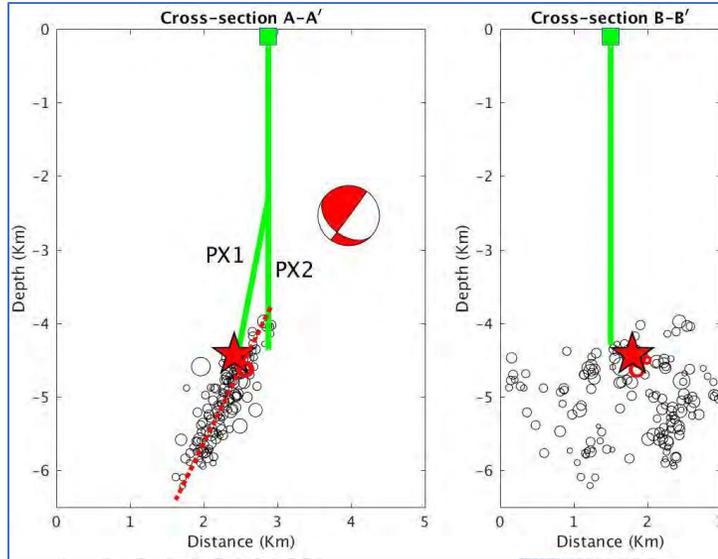


Землетрясение M=5.4 Pohang, Южная Корея, 15.11.2017

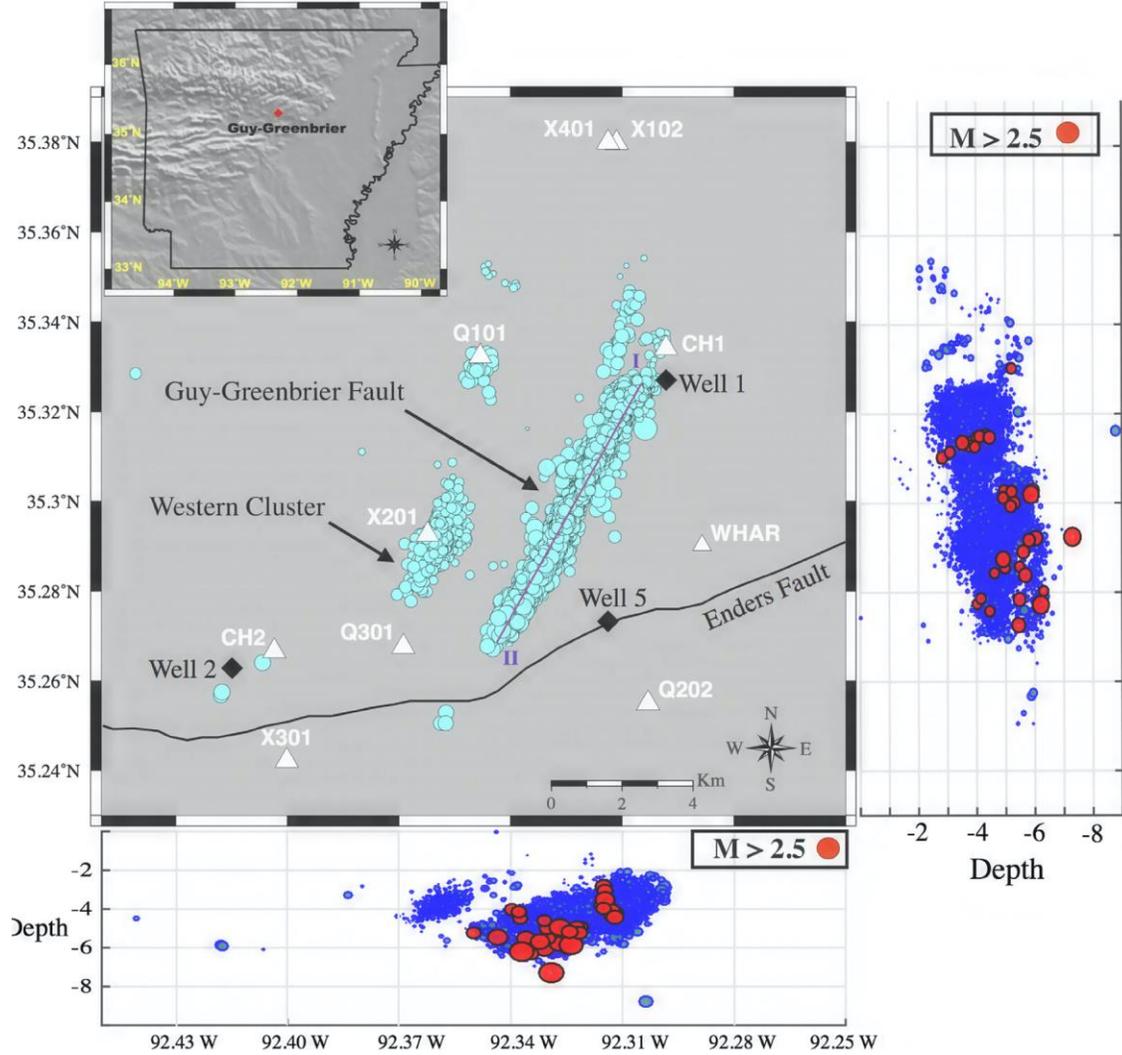
135 потерпевших
297 млн. долларов ущерб
4.5 км глубина гипоцентра



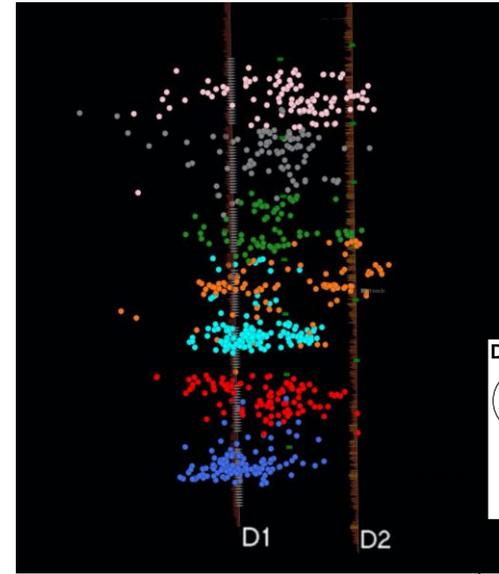
Kwang-Hee Kim^{1*}, Jin-Han Ree^{2*}, YoungHee Kim³
Sungshil Kim², Su Young Kang¹, Wooseok Seo³
¹Pusan National University
²Korea University
³Seoul National University



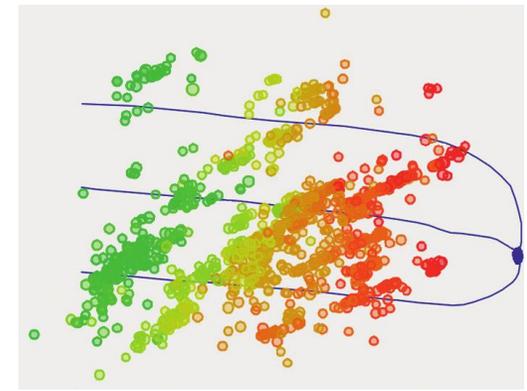
Активируемые разломы и трещины ГРП выявляются сейсмическим мониторингом



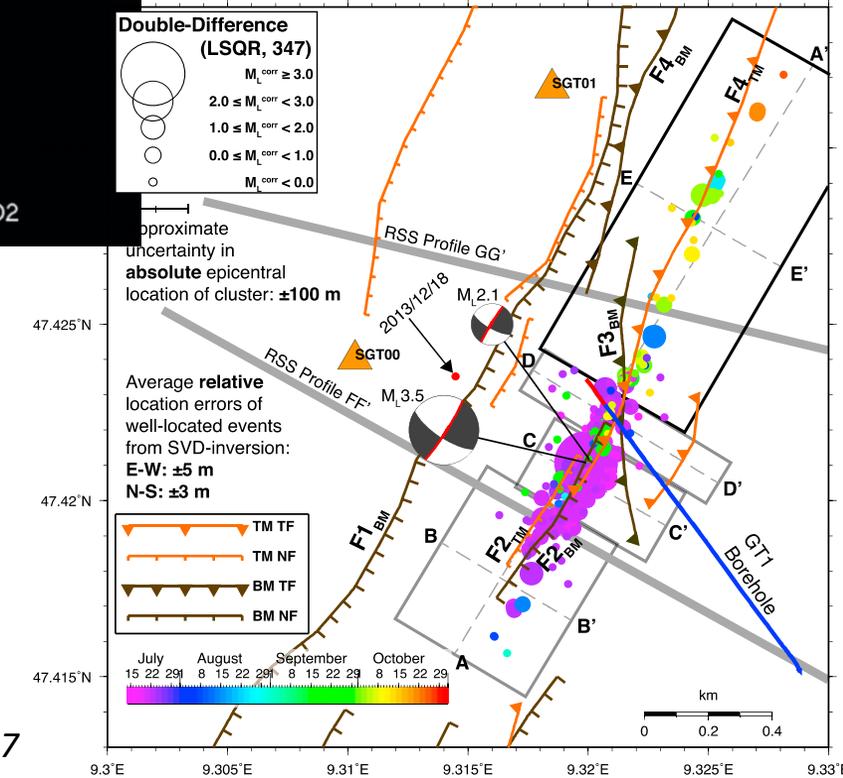
S. Mostafa Mousavi et al, 2017



Mohammad and Miskimins, 2010

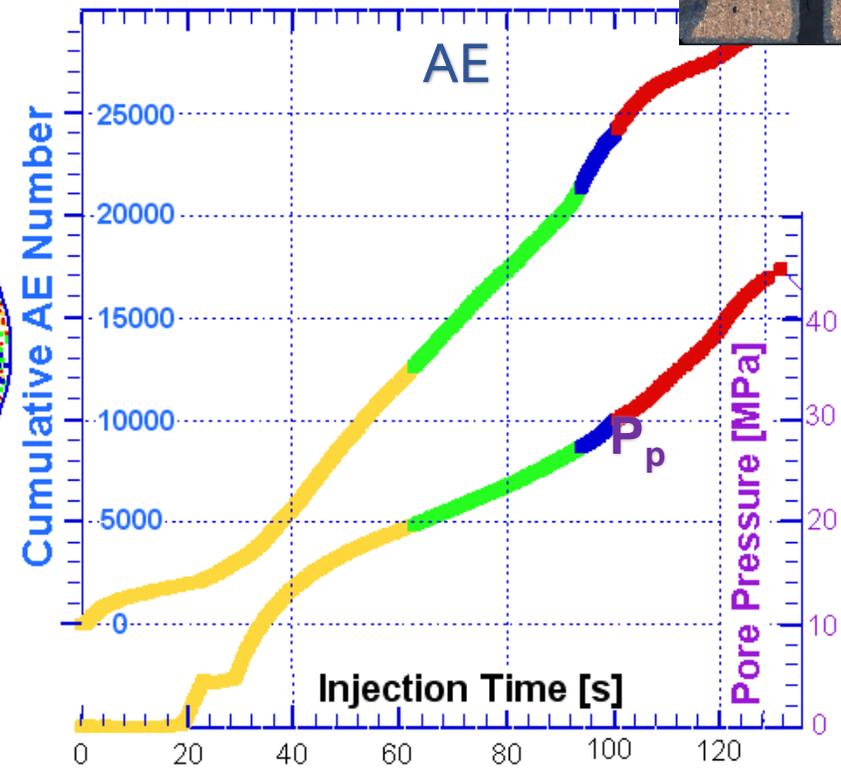
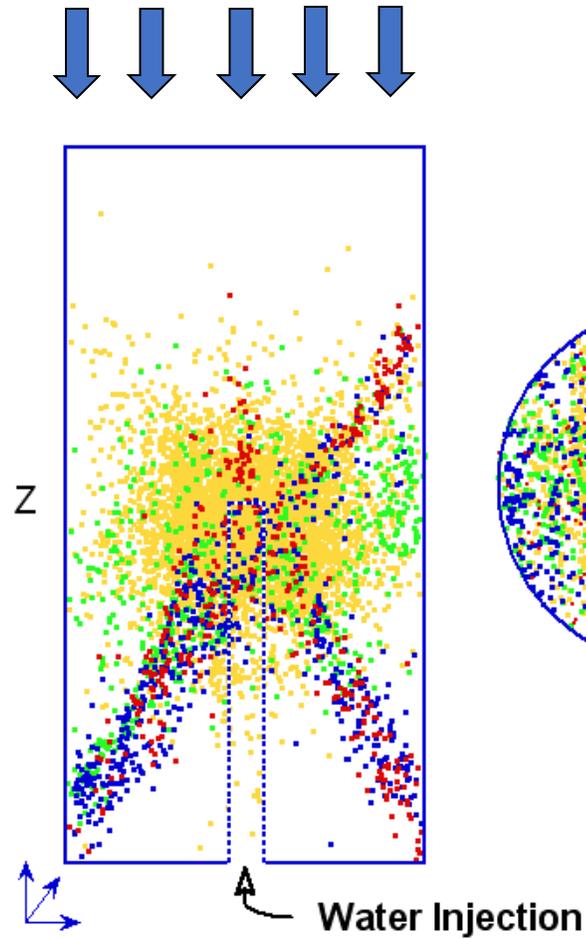


Ngoc-Tuyen Cao, Leo Eisner and Zuzana Jechumtálová, 2020

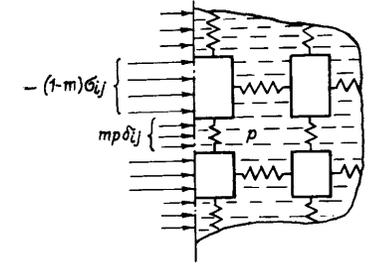


T. Diehl et al, 2017

Разрушение закачкой жидкости в песчаник



Физика сейсмичности при изменении порового давления

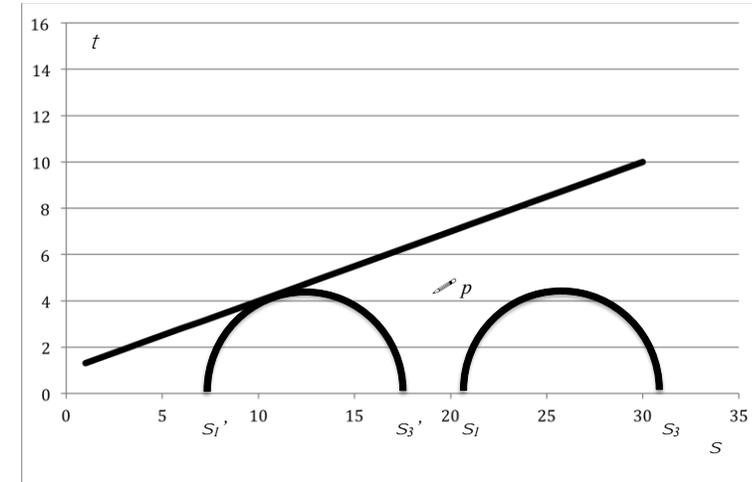


- Основным параметром, ответственным за появление сейсмических событий при закачке жидкости, является поровое давление.
- Достижение поровым давлением жидкости некоторой критической величины, значение которой зависит от величин главных сжимающих напряжений и ориентации естественной трещиноватости, принимается за условие инициирования сейсмогенерирующей подвижки.
- Математически данное условие записывается в виде совместности критерия Кулона и соотношения Мора для эффективных напряжений на площадке, произвольно ориентированной по отношению к осям главных напряжений:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot (\sigma_n - p) = \tau_0 + \text{tg}\varphi \cdot (\sigma_n - p)$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta$$

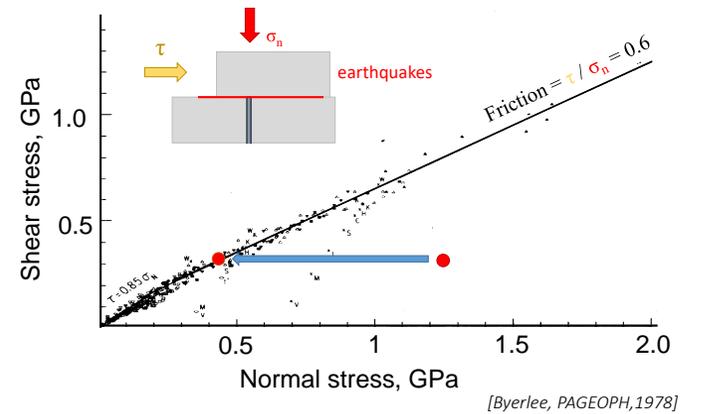
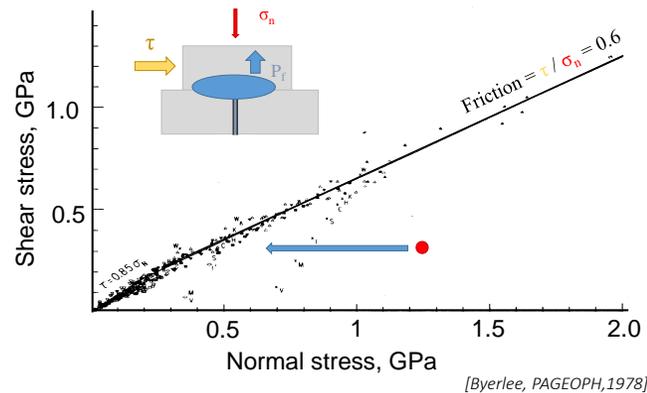
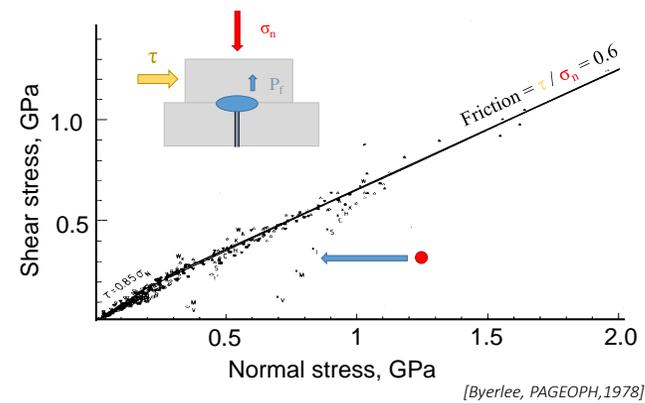
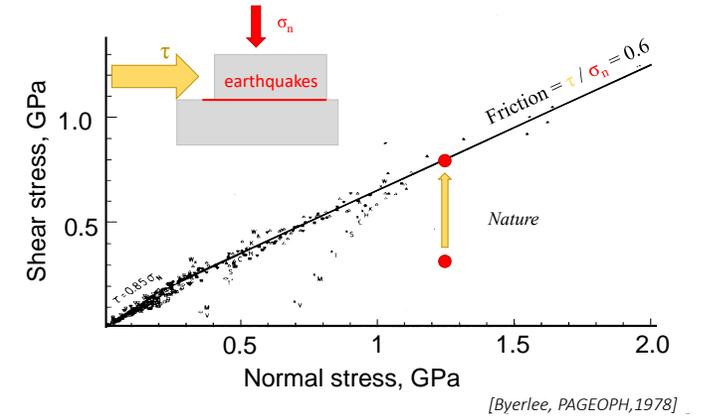
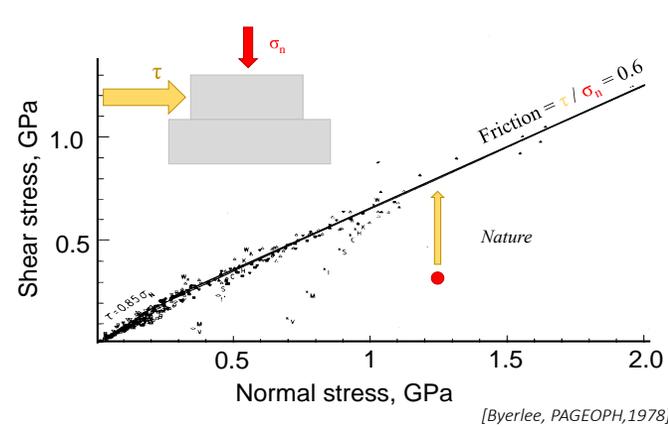
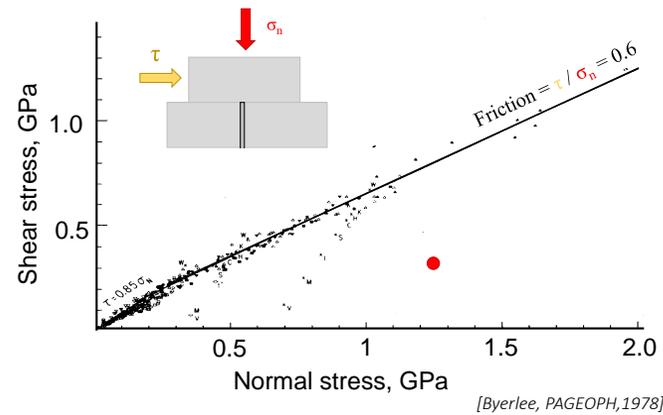
$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta$$



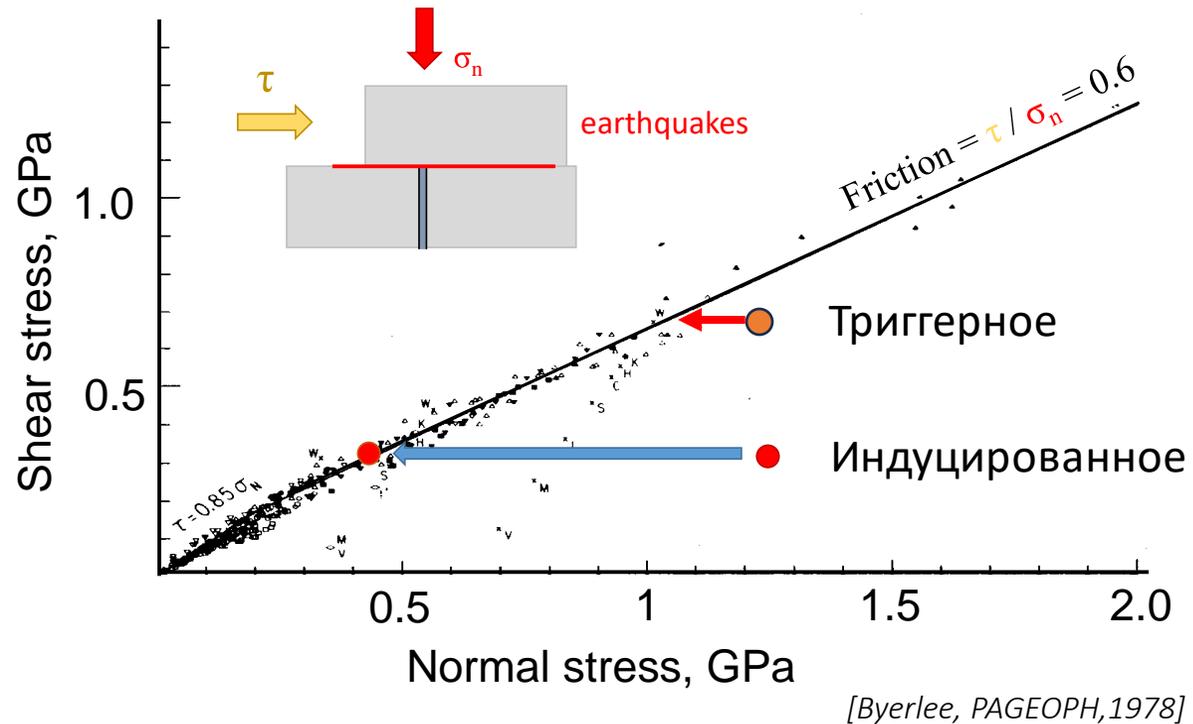
- где τ - касательное напряжение, τ_0 - сцепление (прочность на сдвиг), σ_n - нормальная по отношению к рассматриваемой площадке компонента напряжений, σ_1, σ_3 - максимальное и минимальное главные напряжения, p - поровое давление жидкости, θ - угол между направлением действия максимального главного напряжения и нормалью к площадке, μ - коэффициент внутреннего трения.

Активация естественных разломов и трещин при изменении пластового давления

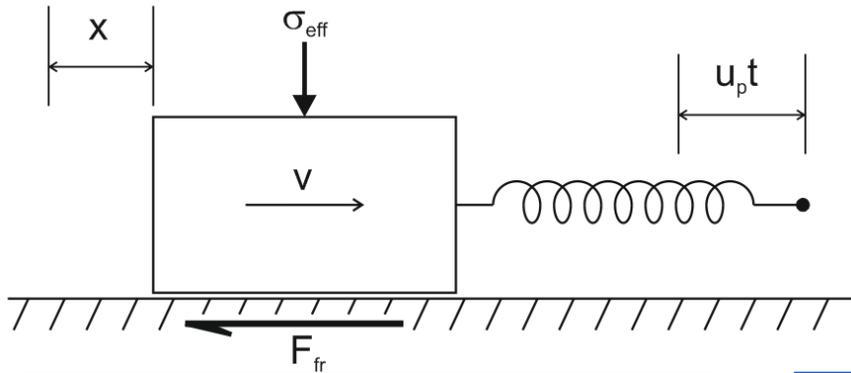
$$\tau^* = C + \mu(\sigma - p)$$



Индуцированные и триггерные землетрясения – в чем разница?



Закон трения rate-and-state



$$\begin{cases} m\ddot{x} = k_s(v_{st}t - x) - F_{fr} \\ F_{fr} = \sigma_N \cdot \mu(v, \theta) \\ \dot{\theta} = \theta(v) \end{cases}$$

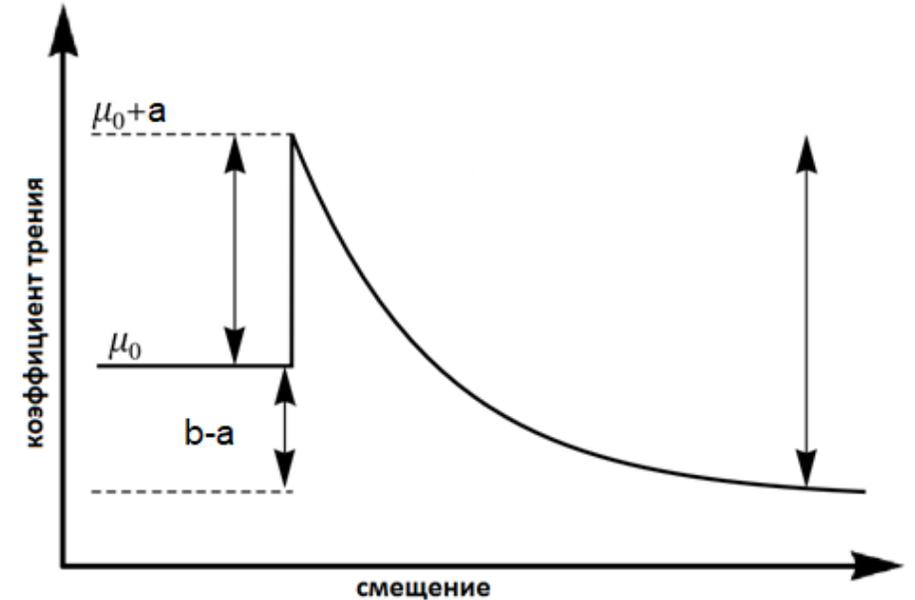
$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v_*}\right) + b \ln\left(\frac{v\theta}{L}\right)$$

Параметр состояния шероховатостей

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

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

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



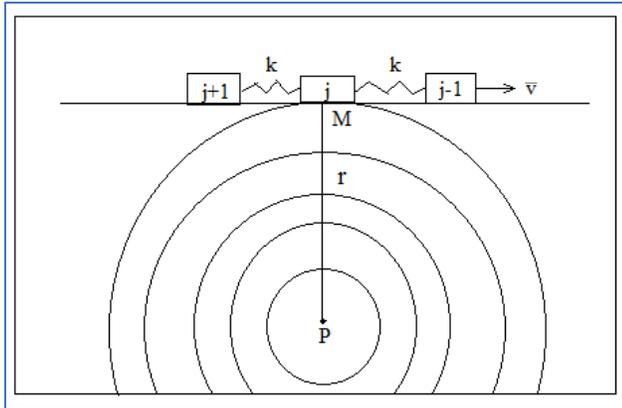
Параметр a отвечает за упрочнение с возрастанием скорости, b – за разупрочнение

k_{cr} – критическое значение жесткости, определяемое параметрами закона трения

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



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

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

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

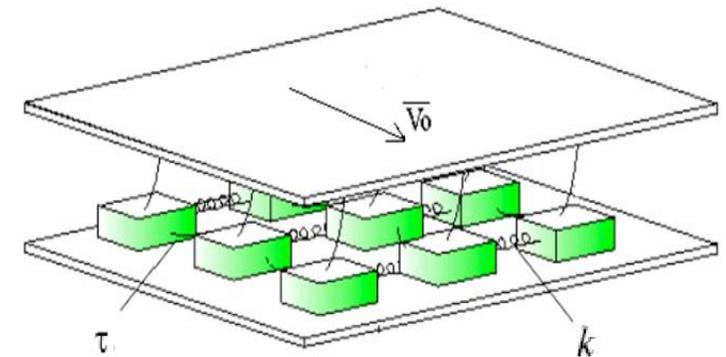
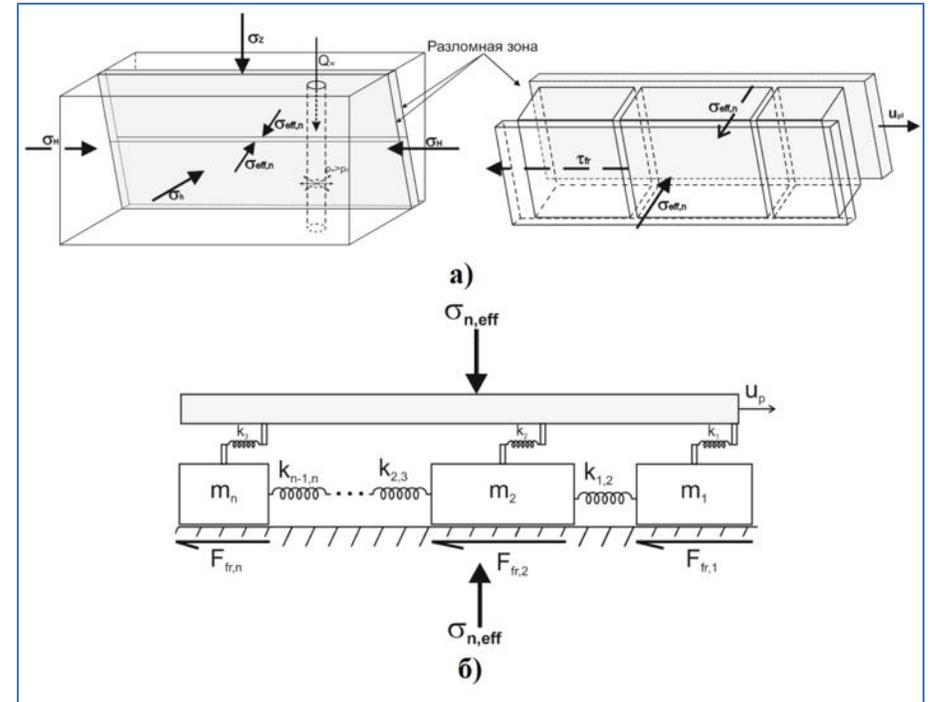
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(v_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_{fr1} \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(v_0 t - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - F_{fr2} \\ \dots \end{cases}$$

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

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

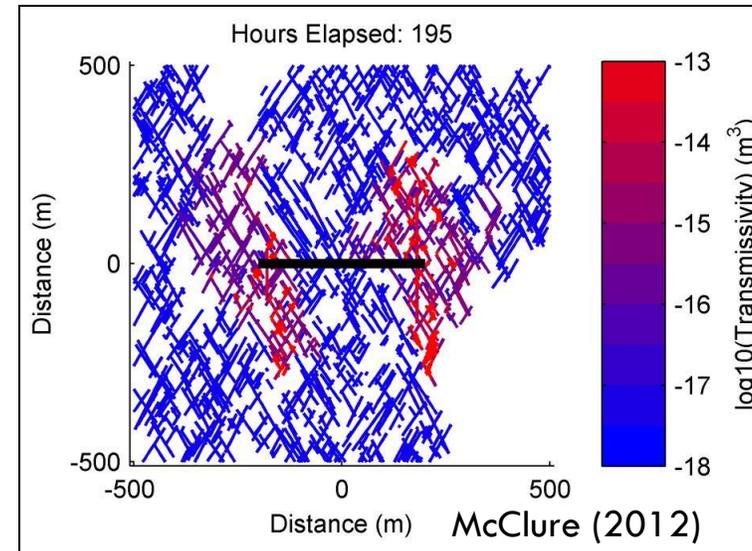
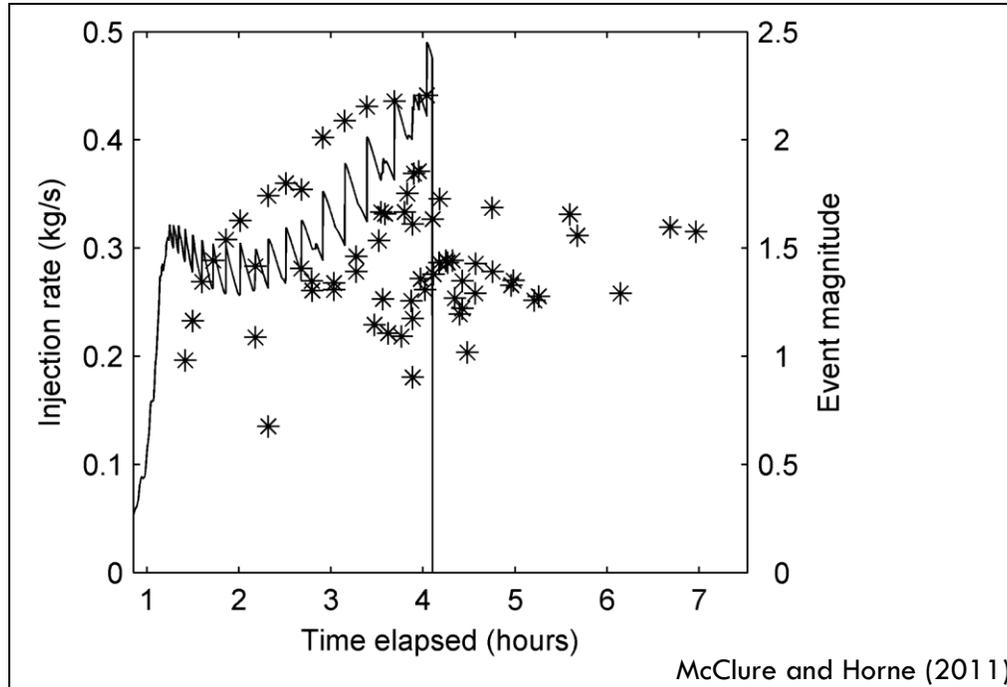
$$M_0 = G \int D dS$$

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

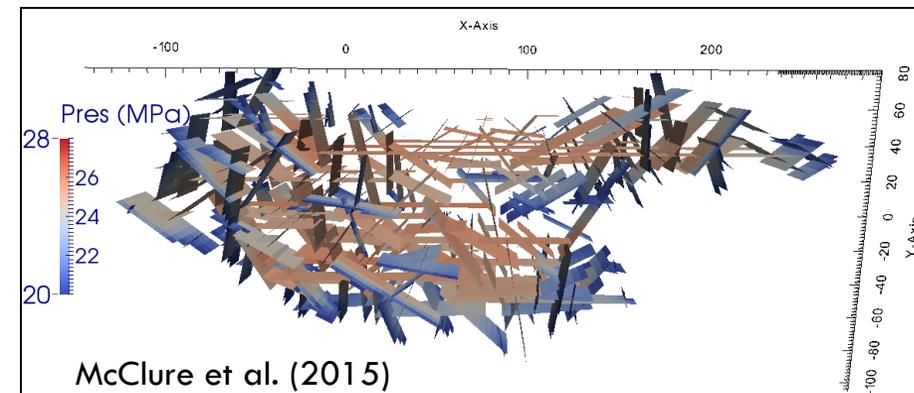


(Brace, Byerlee, 1966; Burridge & Knopov, 1967; Talwani and Acree, 1985, Shapiro et al., 2006, Dinske et al., 2012, McClure, 2012, Willis-Richards et al., 1996; Rahman et al., 2002; Ghassemi and Tarasovs, 2006; Kohl and Mège, 2007; Bruel, 2007; Baisch et al., 2010; Rachez and Gentier, 2010; Deng et al., 2011; Будков А.М., Кочарян Г.Г., Новиков В.А., Крашенинников А.В., 2015)

Численный расчет сейсмичности, индуцированной закачкой в трещиноватый коллектор



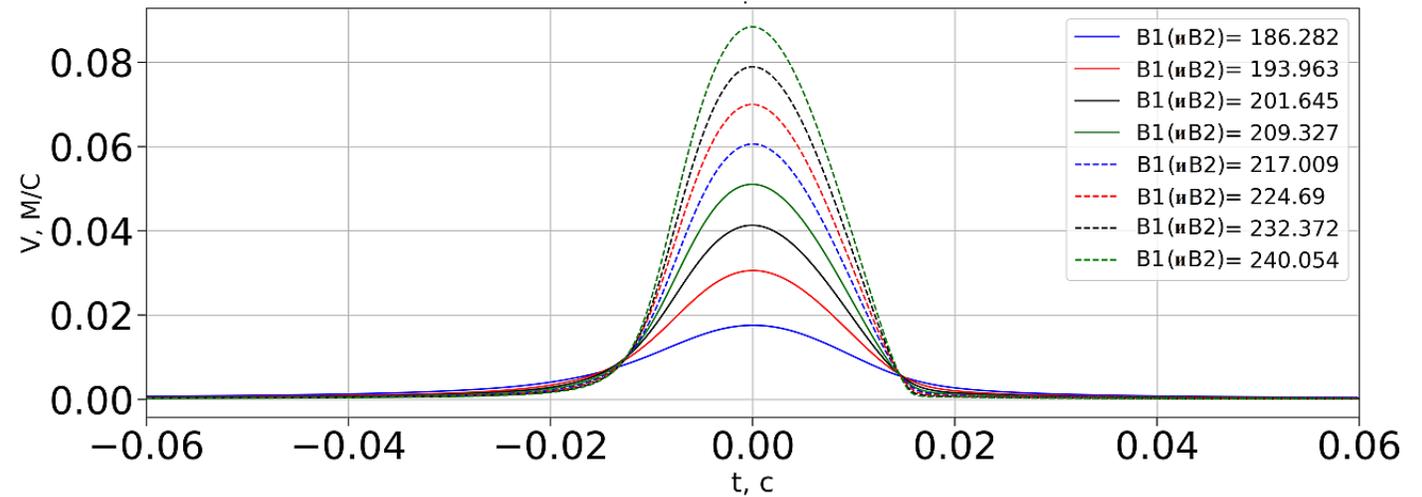
$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k\rho}{\mu} \nabla P \right)$	Mass balance
$ \tau - \eta v \leq \mu(\sigma_n - P)$	Frictional equilibrium
$\mu = f_0 + a \log(v/v_0) + b \log(v_0\theta/d_c)$	Rate and state friction
$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{v\theta}{D_c}$	"Aging" law



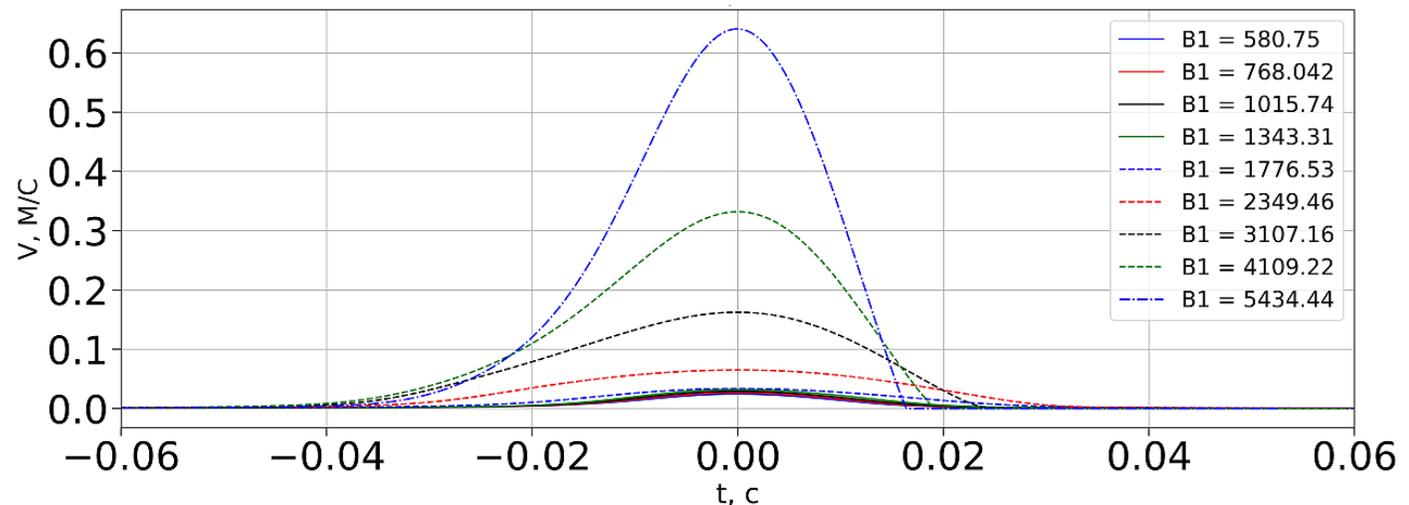
Выбор вида закона трения



Конкретный вид эволюции параметра ϑ закона rate-and-state не является определяющим; 2-х параметрический закон трения позволяет более точно описывать форму скачка по сравнению с однопараметрическим законом, позволяя при этом воспроизводить характерную повторяемость событий



Характерный профиль скорости при скольжении блока



*

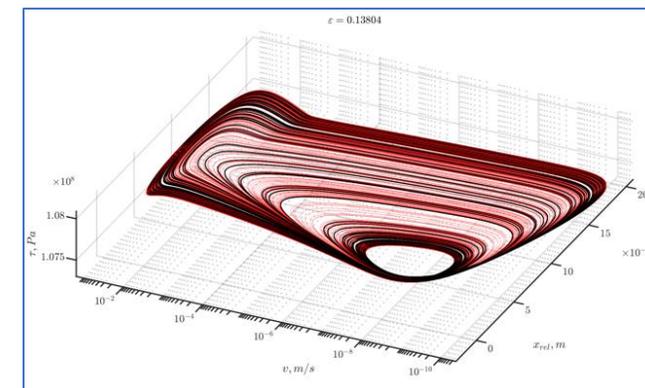
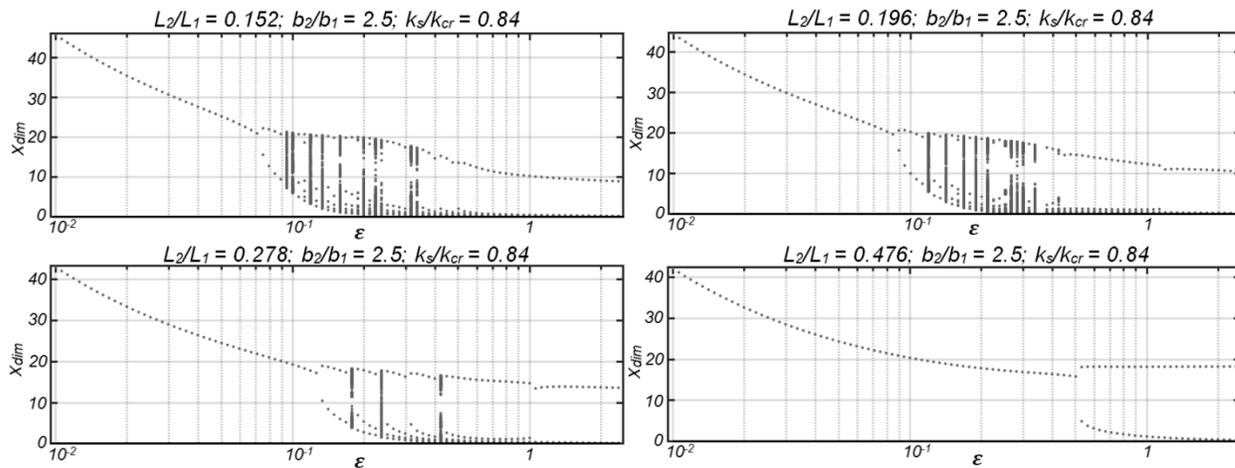
Наблюдаемая сейсмичность, как и скольжение в лабораторных условиях, носит хаотический характер. Однопараметрический закон трения не позволяет описывать апериодическое движение, в отличие от двухпараметрического

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

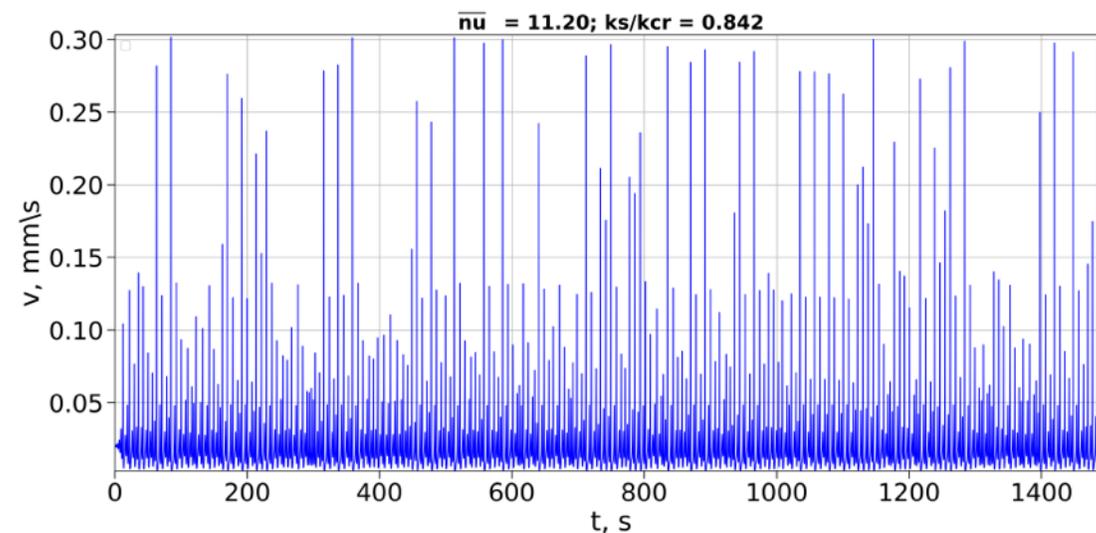
$$\dot{\theta}_i = -\frac{v}{L_i} \left[\theta_i + b_i \ln \left(\frac{v}{v_*} \right) \right]$$

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

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



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



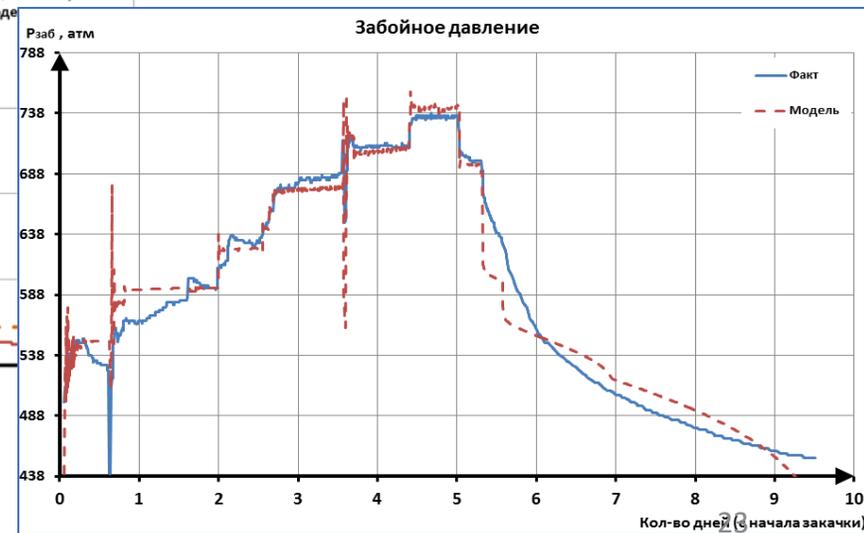
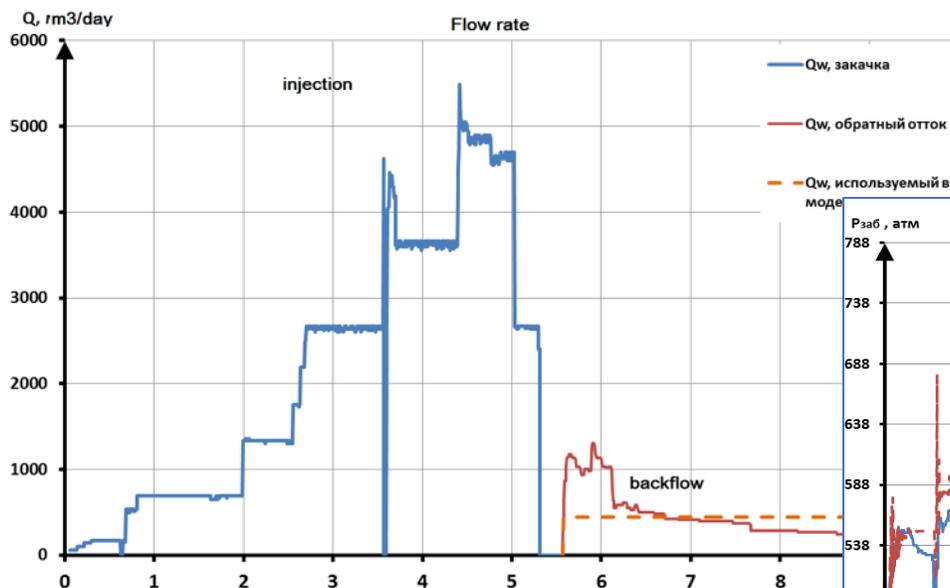
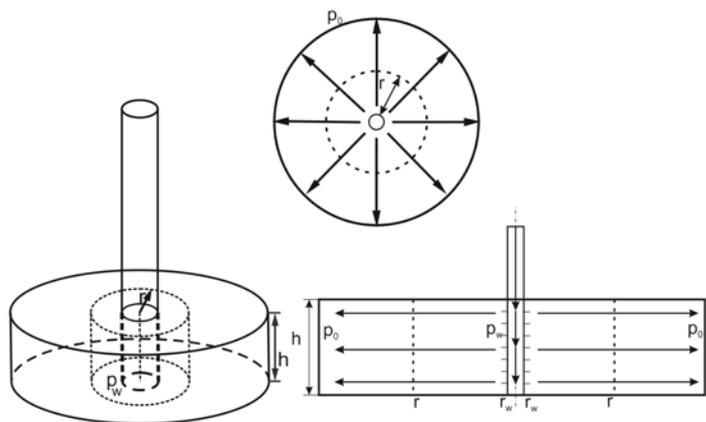
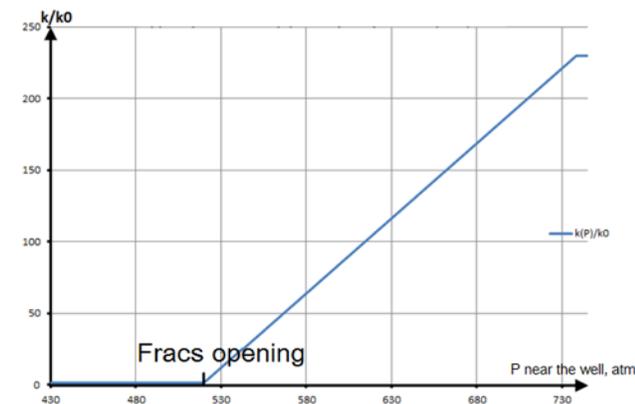
Применение модели для случая Базеля

Изменение давления в результате закачки жидкости (фильтрация радиальная):

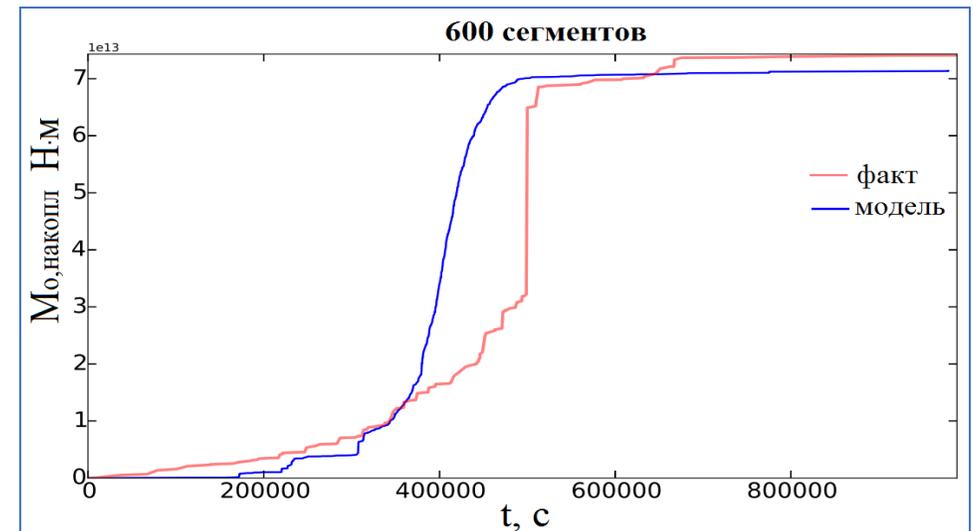
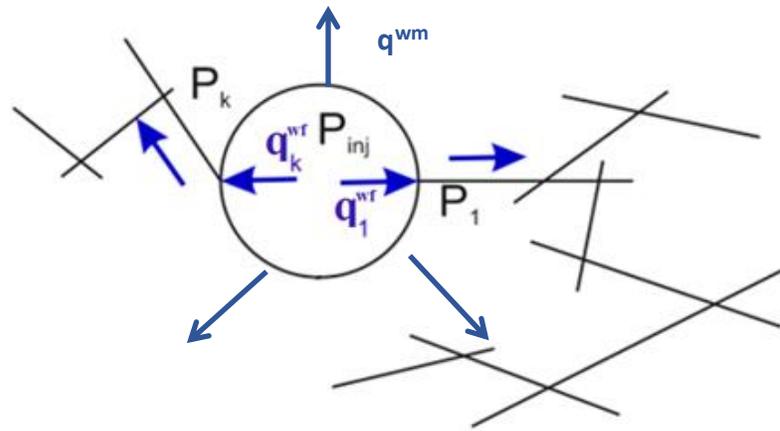
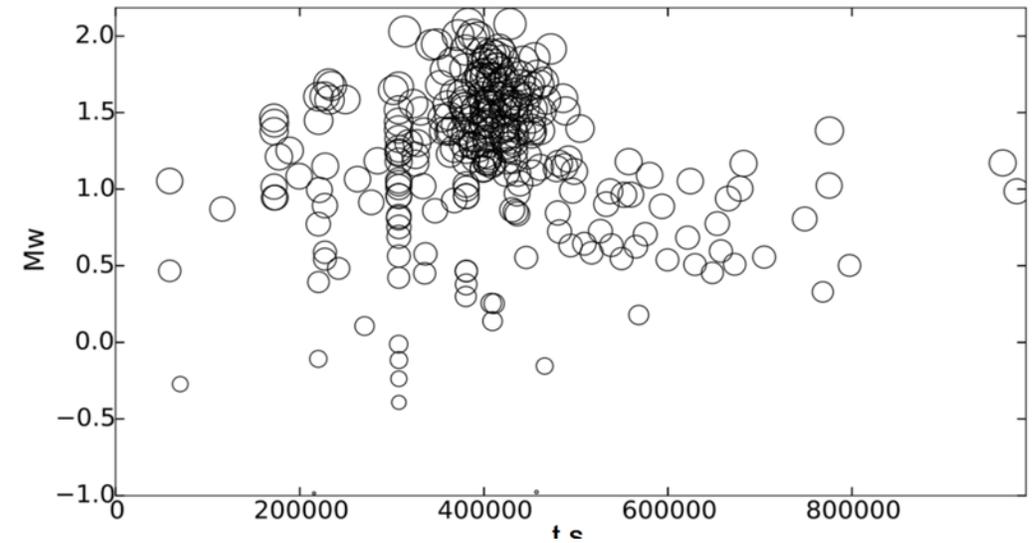
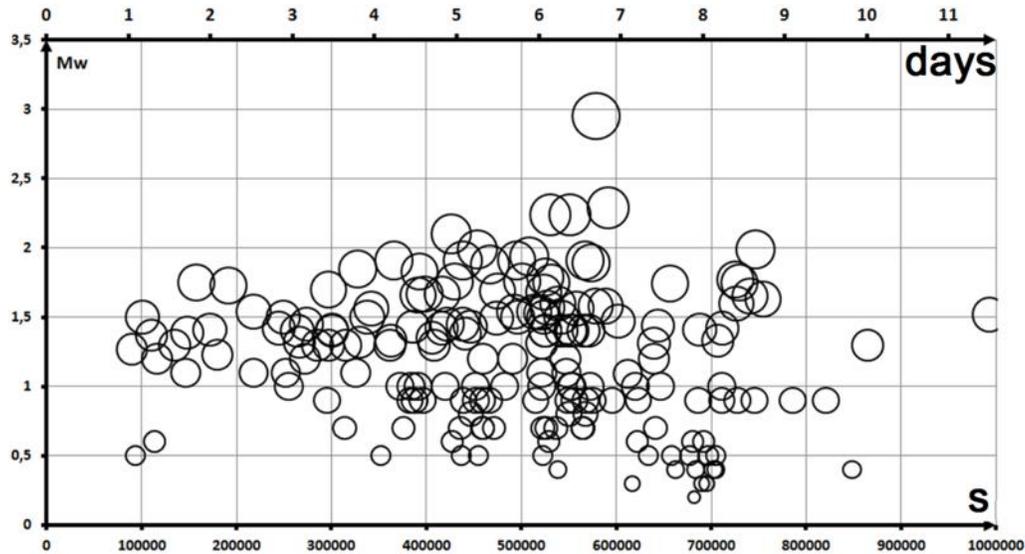
Значения параметров взяты близкими к параметрам, характеризовавшим систему скважина-резервуар проекта Базель (Häring et al., 2008, Dinske, 2010): $r = 100$ м, $Q_0 = 1.5$ м³/мин, $p_0 = 44$ МПа, $\mu = 0.284$ Па·с, $h = 46$ м, $k = 4$ мД

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

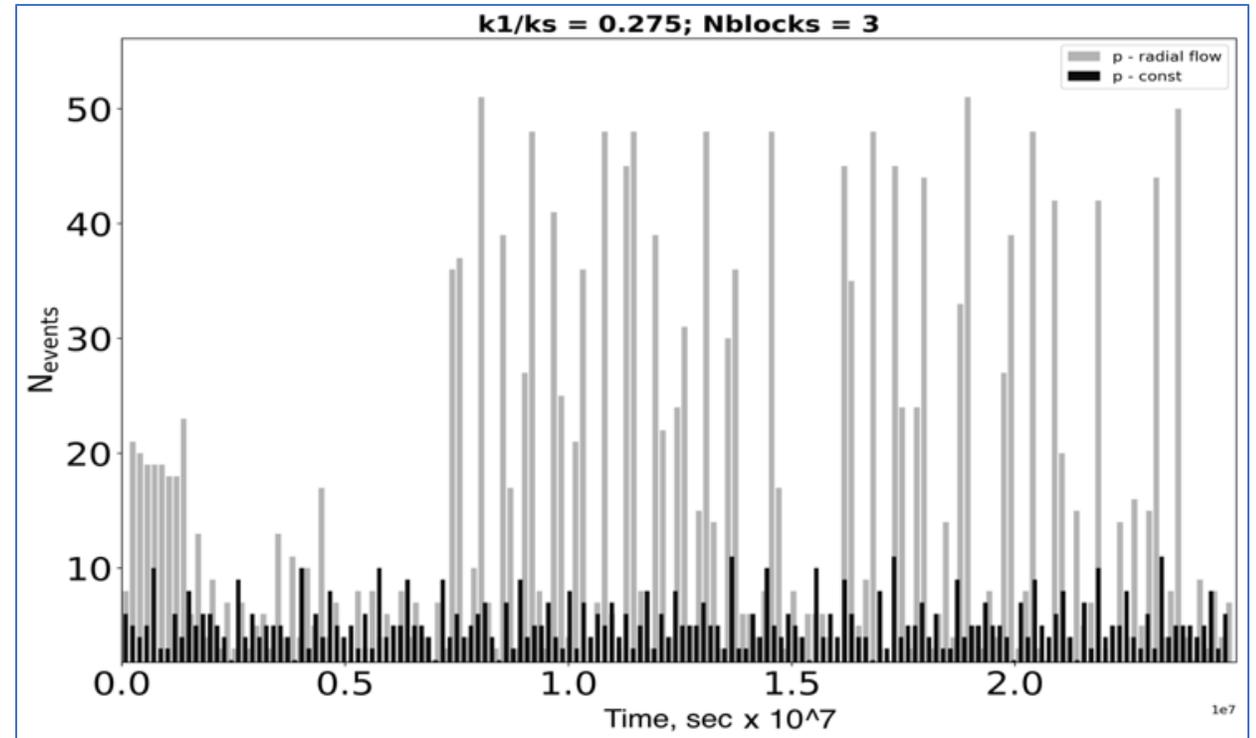
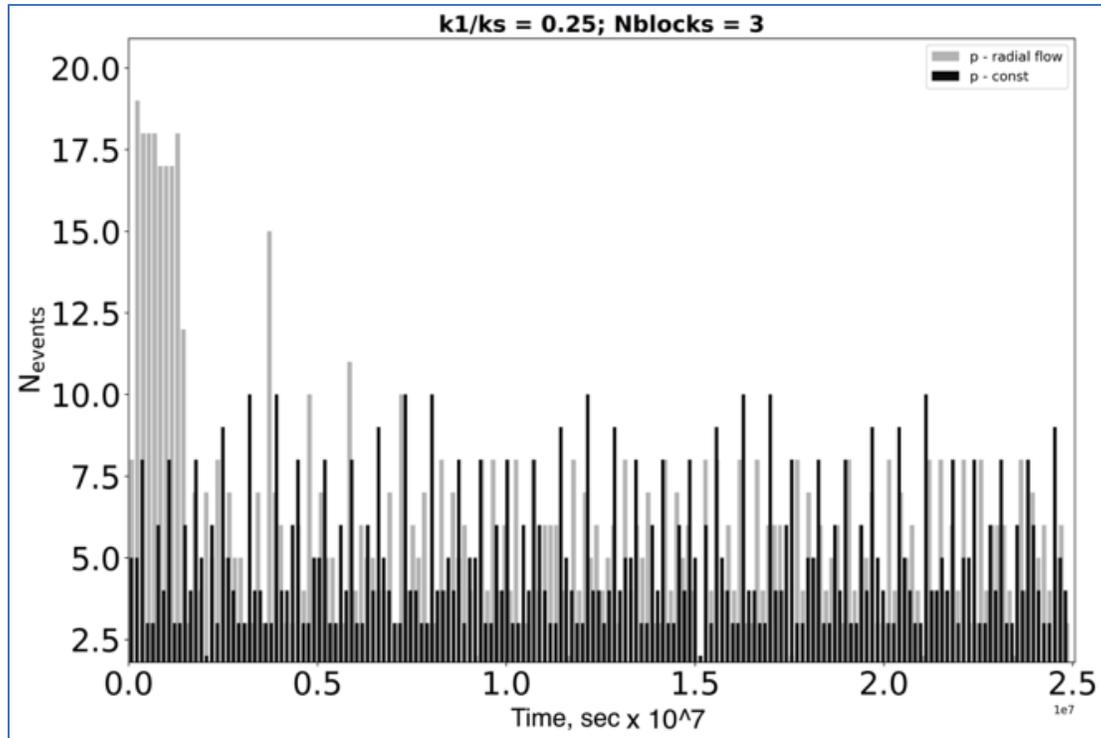
$$Ei(t) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$$



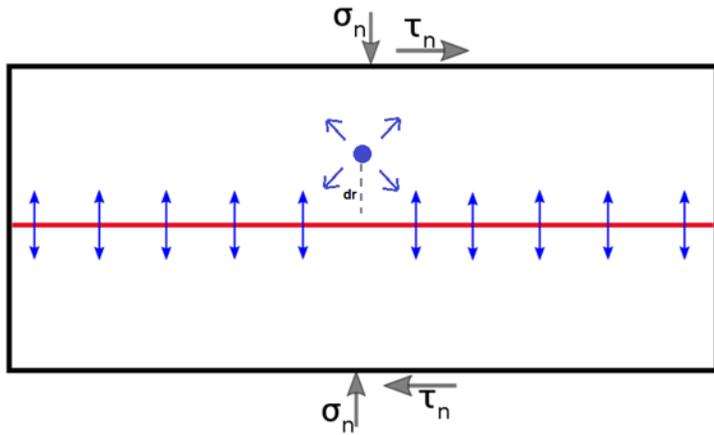
Применение модели для случая Базеля



Возможные сценарии развития сейсмичности при закачке



Влияние параметров закачки и свойств разлома на процесс скольжения

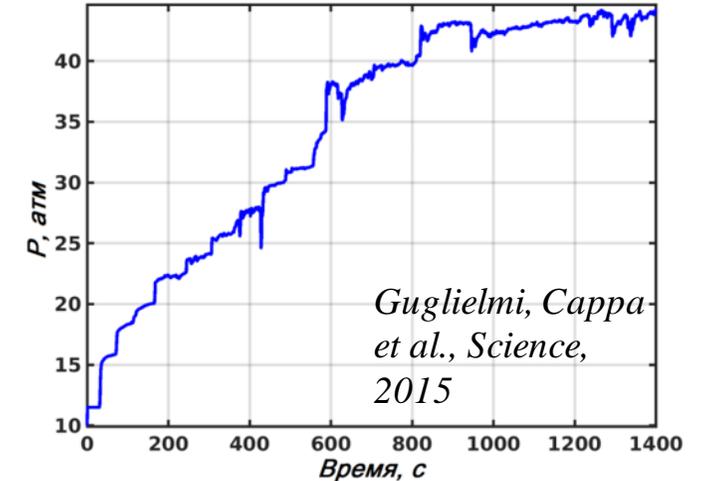
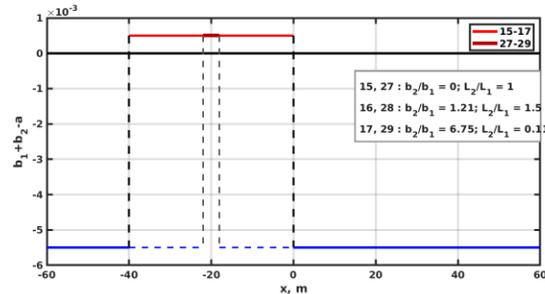
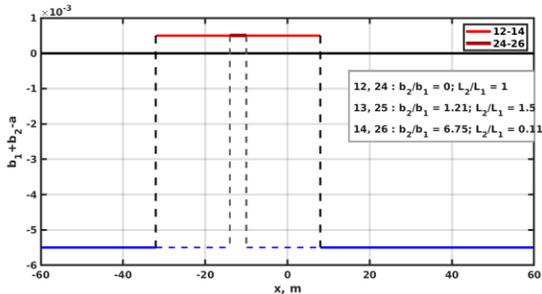
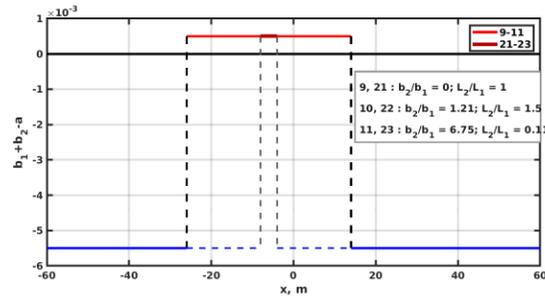
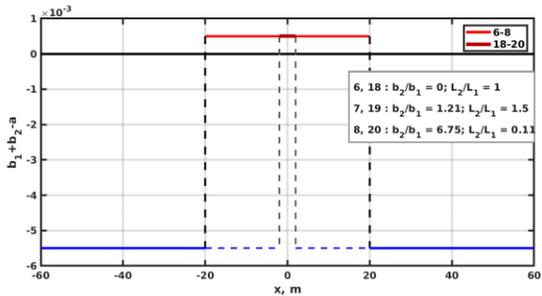


Проницаемый разлом (начальная ширина ~10 мкм, проницаемость 8 Д) находится в малопроницаемой породе (2 мкД). В результате закачки происходит асейсмическое скольжение трещины. Характерное смещение в центральной части 600 мкм.

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

Зона разупрочнения

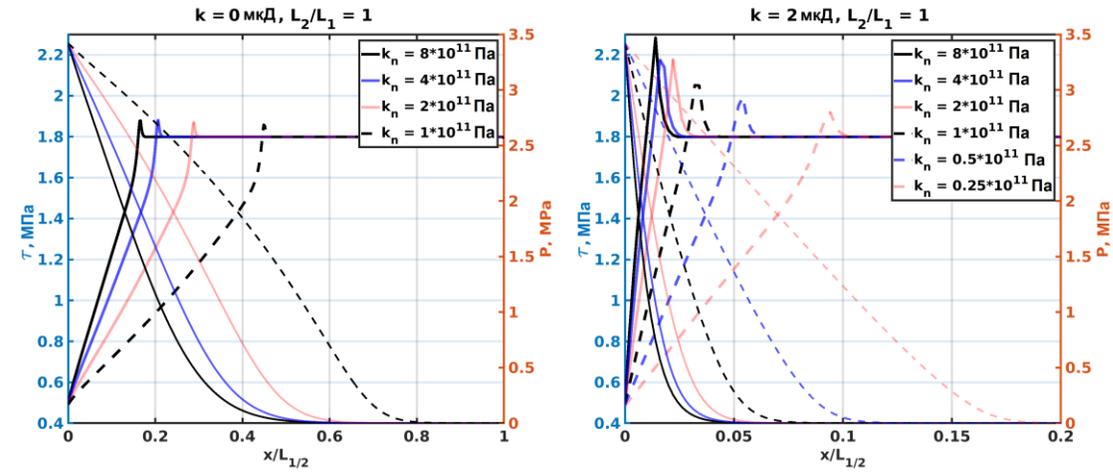
Зона упрочнения



Забойное давление в скважине

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



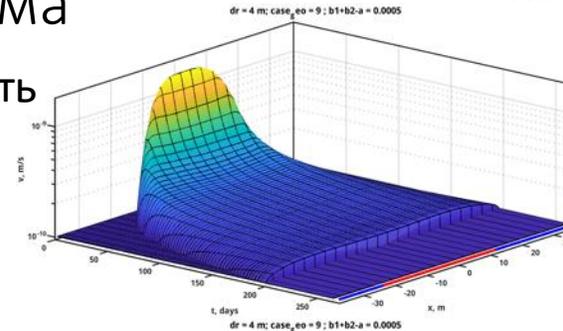
Профили вдоль полудлины для касательного напряжения и порового давления в конце расчета для различных значений нормальной жесткости и поровой проницаемости породы ($\tau_0 = 1.8$ МПа):
 а - непроницаемая порода, *b* - малопроницаемая порода.

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

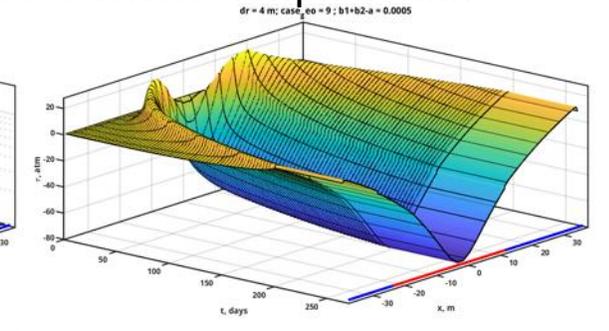
В. Ю. Рига, С. Б. Турнтаев. Моделирование индуцированной сейсмичности на основе двухпараметрического закона rate-and-state. // Физика Земли, 2021

Касательные напряжения

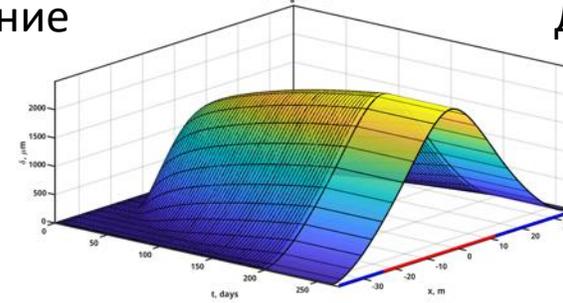
Скорость



Давление

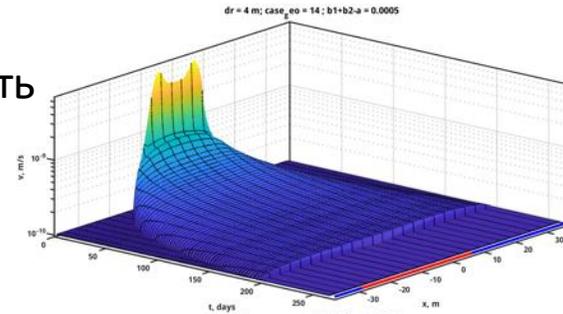


Смещение

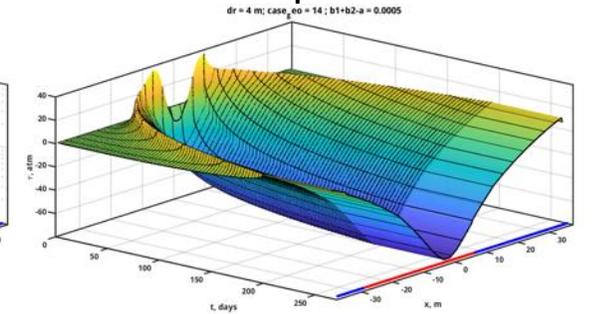


Касательные напряжения

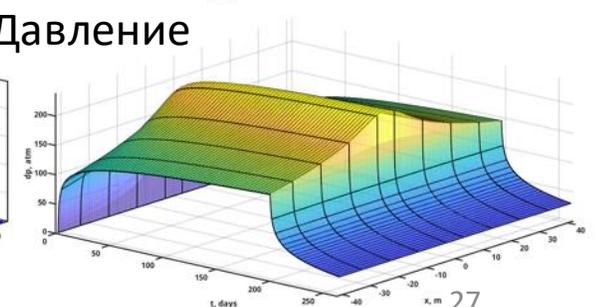
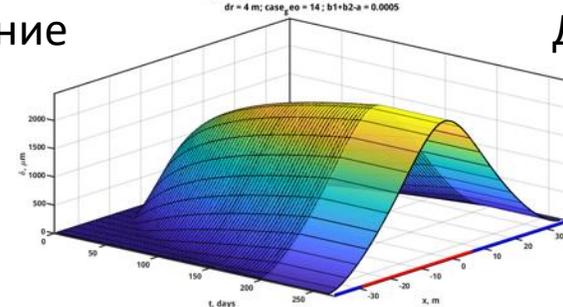
Скорость



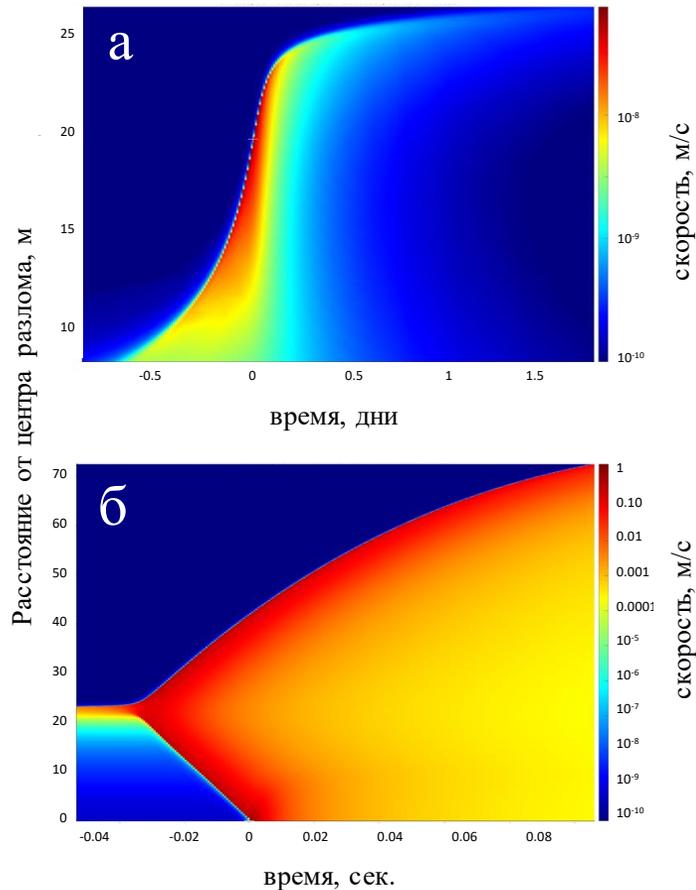
Давление



Смещение



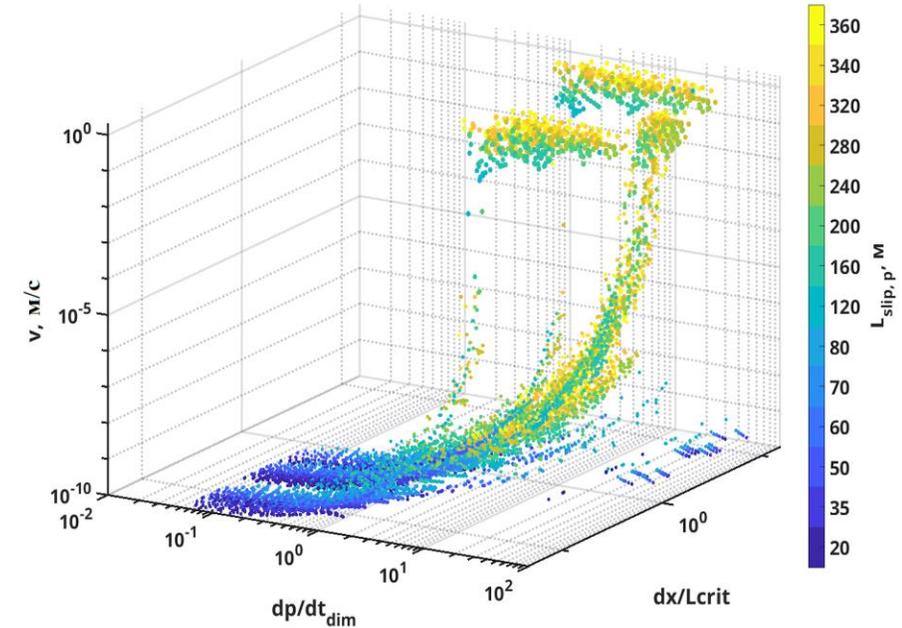
Развитие асейсмического и сейсмического режима скольжения тектонического разлома при закачке жидкости



а) асейсмический и б) сейсмический режим скольжения разлома

Условия перехода от медленных к сейсмогенерирующим подвижкам по тектоническому разлому в результате закачки жидкости через скважину, находящуюся вблизи разлома. Реализация того или иного типа движения определяется параметрами закачки и условиями на разломе. Переход к сейсмогенерирующему режиму в рамках рассмотренной модели происходит скачкообразно, дальнейшее увеличение скорости закачки не приводит к росту скорости сейсмогенерирующей подвижки, достигающей значений 0,1-1 м/сек в зависимости от тектонических напряжений.

В.Ю. Рига, С.Б. Турунтаев. Численное исследование явления возникновения сейсмической подвижки на разломе в результате закачки флюида. // Физика Земли, 2024, в печати.



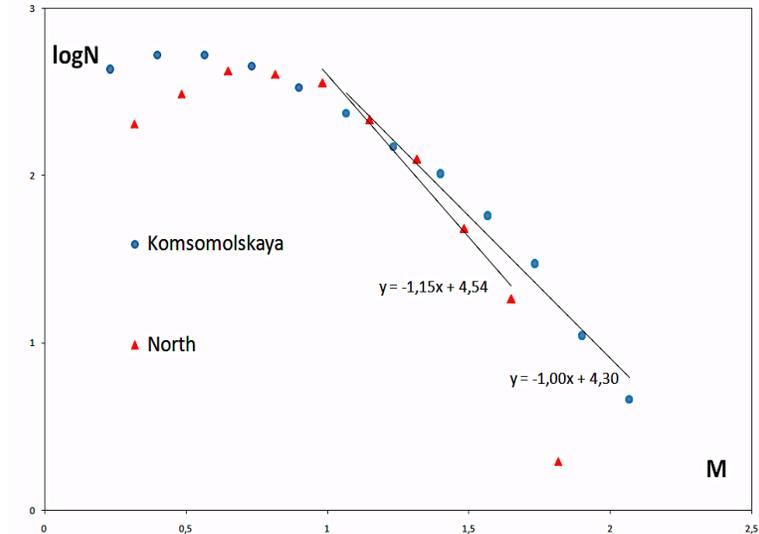
Зависимость максимальной скорости скольжения от скорости изменения давления и длины зоны, на которой нарушается критерий Кулона. Каждая точка соответствует одному расчету. Цвет соответствует задаваемой длине разлома, на которой нарушается критерий Кулона только за счет роста давления.

Критерии дискриминации естественной и техногенной сейсмичности

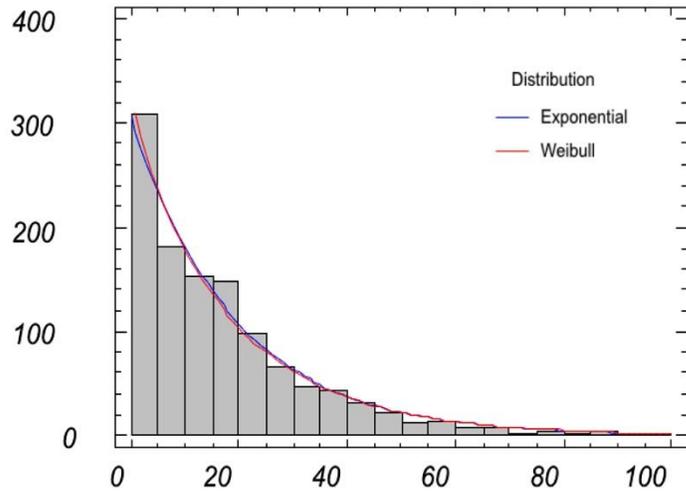
1. Угол наклона графиков повторяемости - увеличение.
2. Распределение интервалов времени между последовательными сейсмическими событиями (времена ожидания землетрясения) – от экспоненциального распределение к распределению Вейбула.
3. Пространственная миграция гипоцентров землетрясений (микроземлетрясений) по отношению к области воздействия - приближение.
4. Наличие детерминированной составляющей, определяемой воздействием – снижение размерностей фазовых траекторий.
5. Появление корреляционных связей между параметрами воздействия (давление, объемы закачки и добычи и т.д.) и параметрами сейсмического режима.
6. Изменение механизмов землетрясений по сравнению с механизмами тектонических землетрясений – не обязательно.

Углы наклона графиков повторяемости

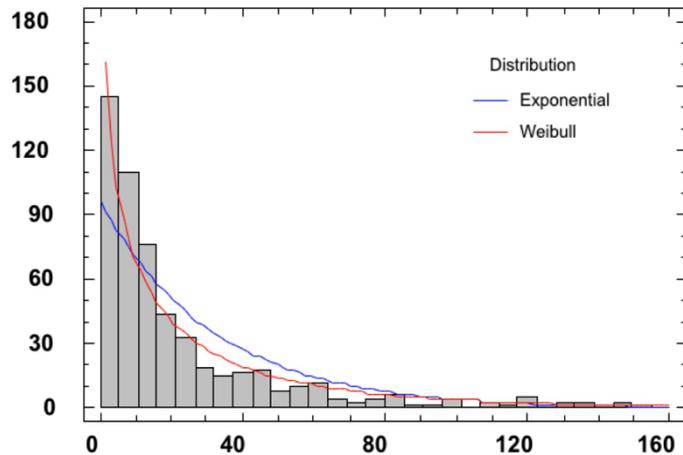
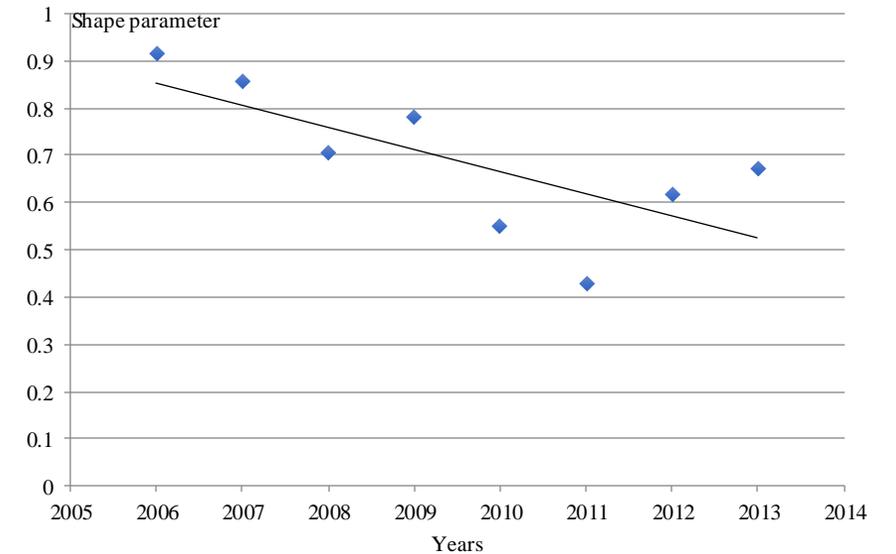
Объект	тангенс угла наклона	во время или после воздействия	естественная сейсмичность региона
СУБР	шахта 14	1,3	0,99
	шахта 15	1,02	
Ромашкинское нефтяное месторождение		1,02 – 1,3	
район шельфовых месторождений Сахалина		0,9	0,78
Район взрывов на р. Бурлыкия и Уч-Терек		0,77	0,68
Таштагольский рудник		0,82	0,68
Воркутинский угольный бассейн	шахта Северная	1,17	0,99
	шахта Комсомольская	1,03	
угольная шахта в Баренцбурге		0,95	0,6



Распределение интервалов времени между последовательными сейсмическими событиями (времена ожидания землетрясения)

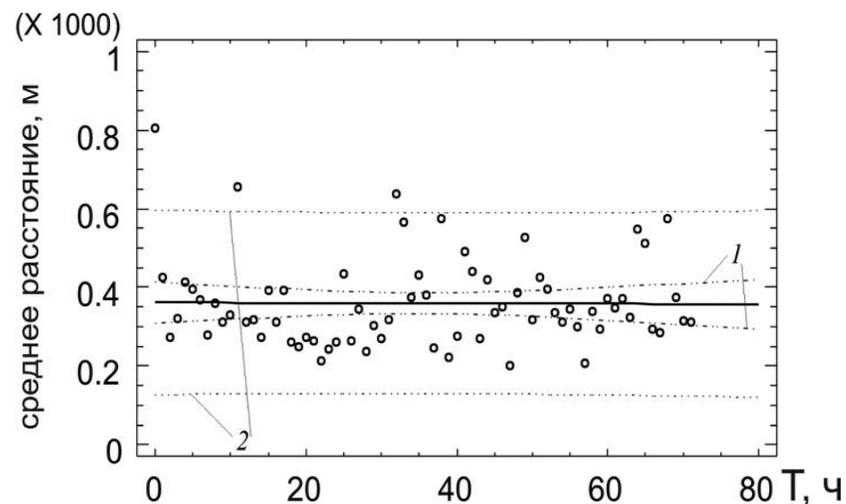
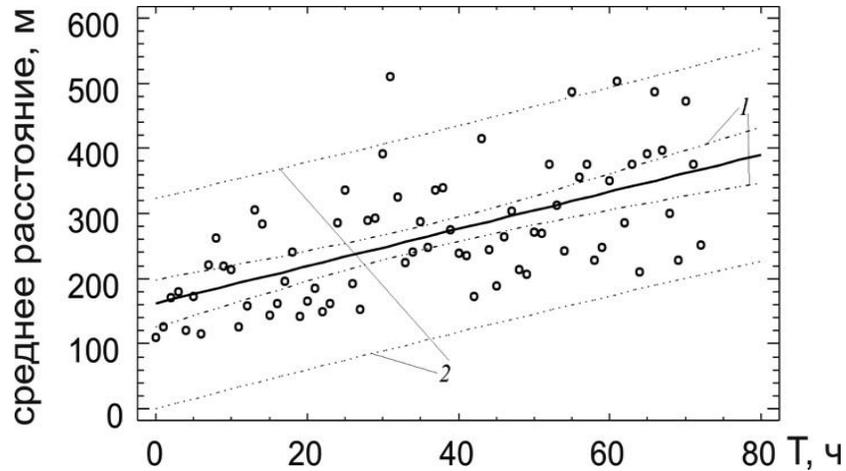


Распределения интервалов времени между последовательными сейсмическими событиями разной энергии в районе месторождений углеводородов шельфа о. Сахалин: а – по данным регионального каталога 1950 – 1990гг., б – по данным локального каталога 2006 – 2014гг.

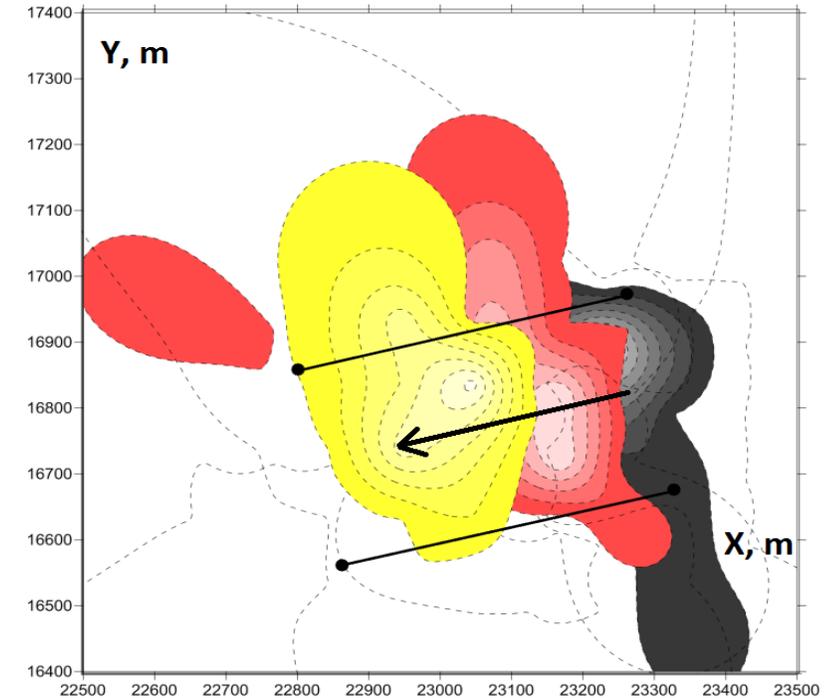


Объекты	параметр формы распределения Вейбулла
СУБР	0.81
Таштагольский рудник	0.57
Ромашкинское нефтяное месторождение	0.50
район шельфовых месторождений Сахалина	до 1991
	после 2006
	1.15
	0.74

Пространственная миграция гипоцентров землетрясений (микроземлетрясений) по отношению к области воздействия (приближение – удаление).



Графики усредненного для всех взрывов на Таштагольском месторождении расстояния от гипоцентров событий до гипоцентров взрывов, события взяты за неделю до (нижний график) и за 3 дня после взрыва (верхний график) с шагом 1 ч.



Изолинии количества сейсмических событий, происходивших в течение полугода на шахте Северная. Прямые линии показывают границы разрабатываемой лавы, стрелка – направление разработки. Более темные области соответствуют более ранним событиям, градация тона в пределах области от темного к светлому соответствует росту количества событий на единицу площади.

Наличие детерминированной составляющей, определяемой воздействием.

Метод Грассбергера-Прокачиа основан на вычислении корреляционного интеграла

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(\varepsilon - \|z_i - z_j\|)$$

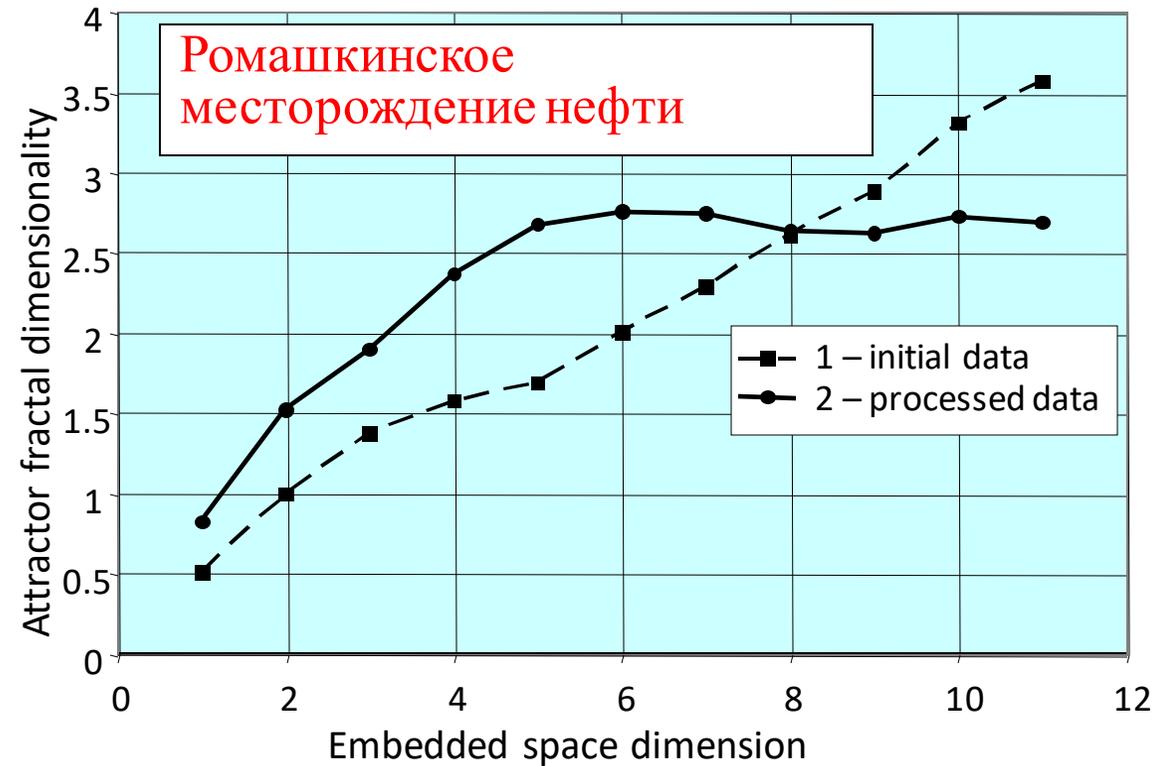
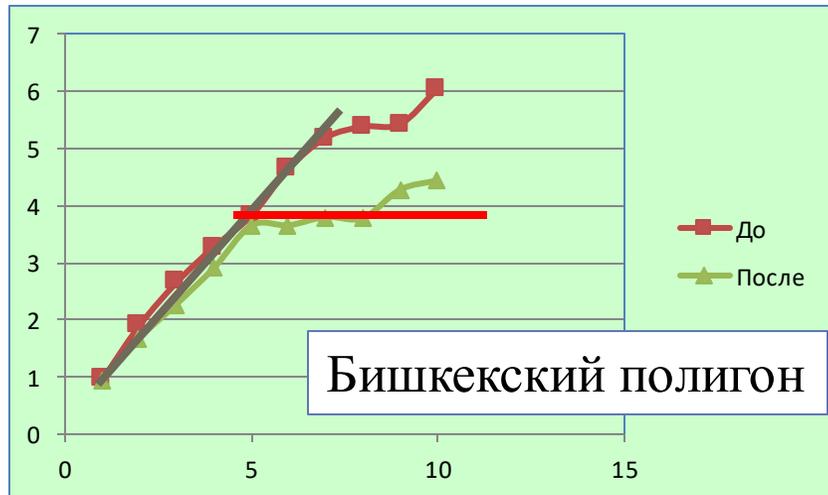
где N – число элементов временного ряда, $\|z_i - z_j\|$ – расстояние между точками в реконструируемом фазовом пространстве, ε – критерий близости точек, $\theta(x)$ – функция Хевисайда.

Размерность аттрактора d (зависящая от размерности пространства вложения m) оценивается путем линейной аппроксимации зависимости

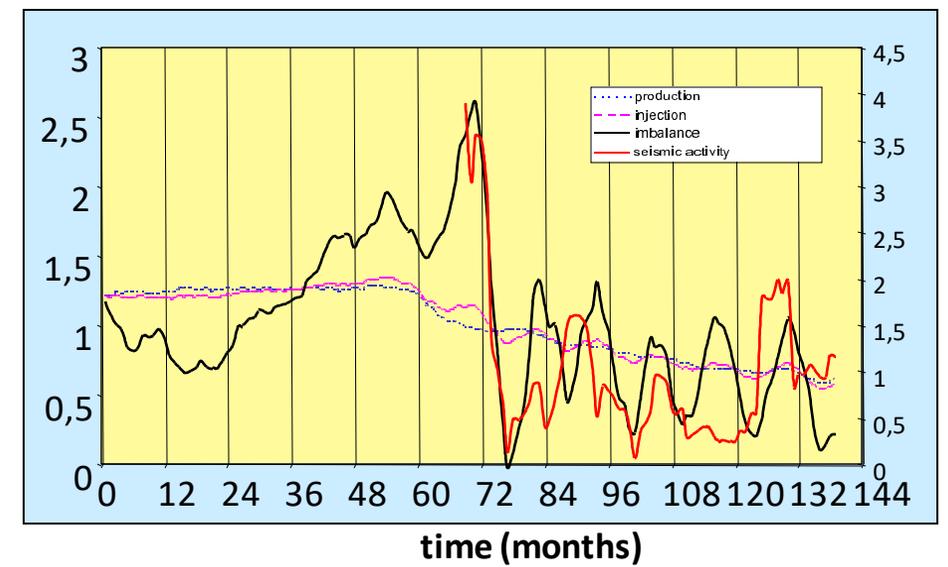
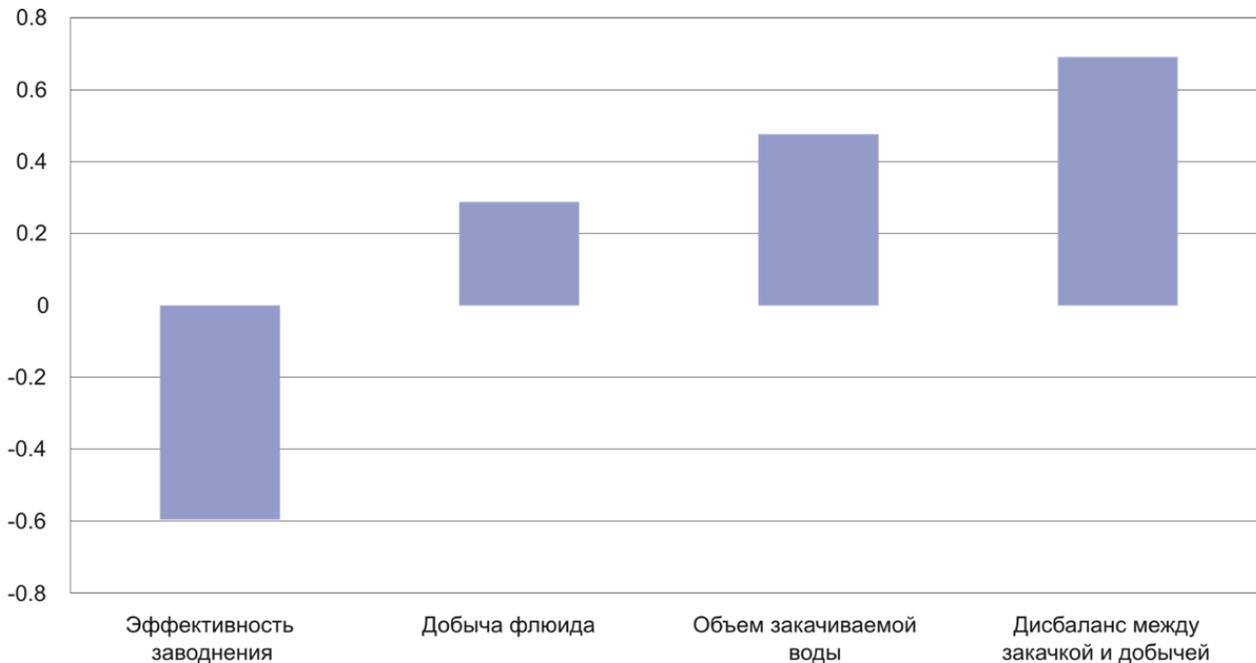
$$\log C(\varepsilon) \cong d \log \varepsilon + c$$

для малых ε . В случае отклонения зависимости $d(m)$ от прямой система обладает устойчивым состоянием. Соответствующие величины d^* и m^* рассматриваются, как фрактальная размерность аттрактора и минимальное количество переменных, необходимых для описания поведения изучаемой системы в устойчивом состоянии.

Снижение корреляционной размерности

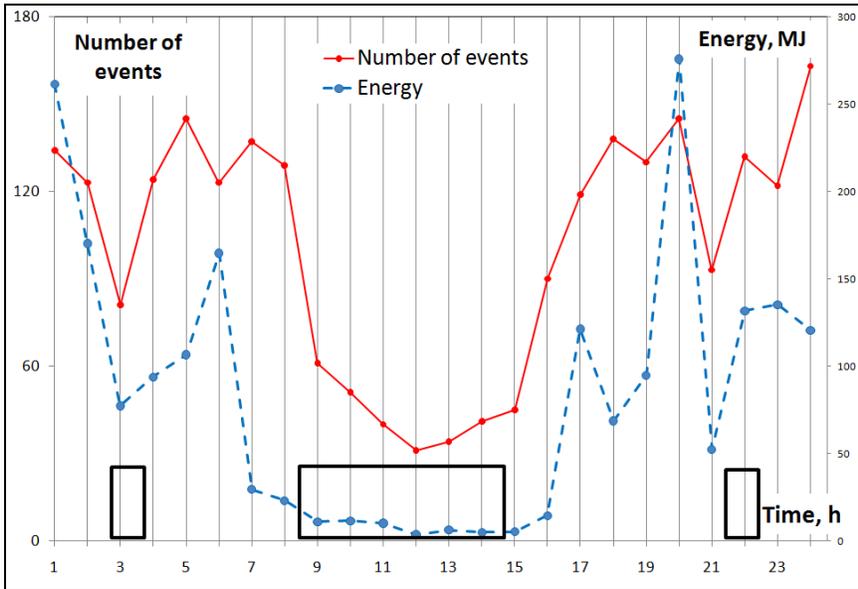


Наличие корреляционных связей между параметрами воздействия и параметрами сейсмического режима

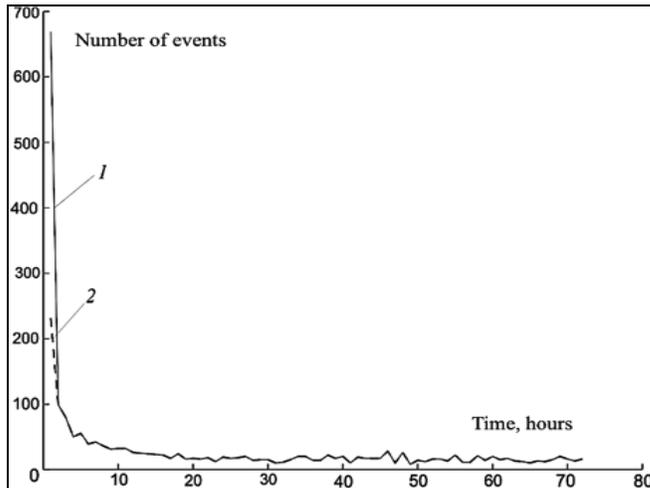
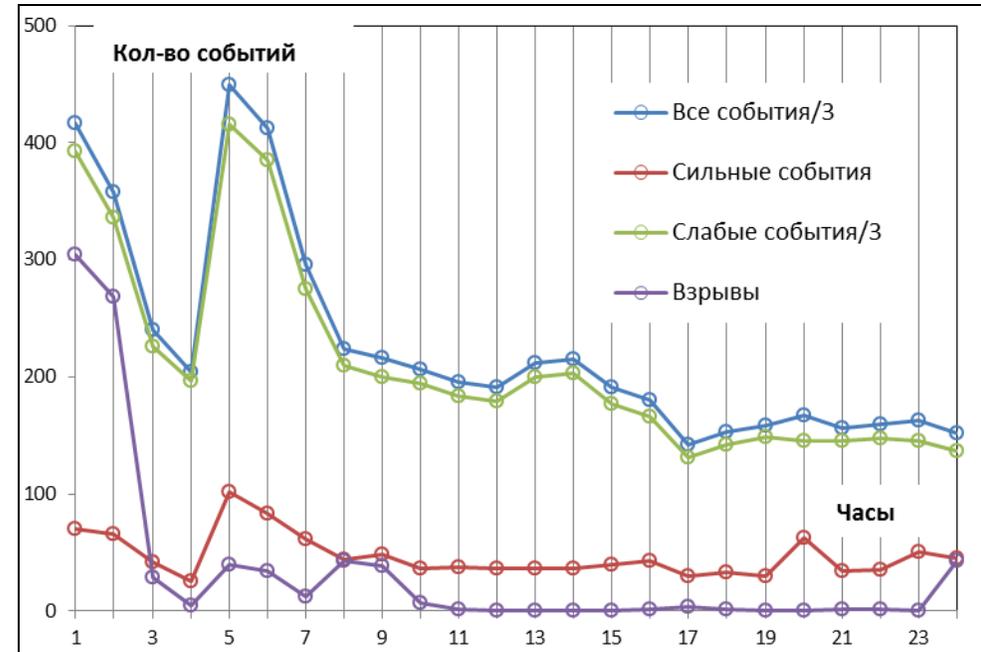


Ромашкинское месторождение нефти
Корреляция между сейсмической активностью и параметрами разработки

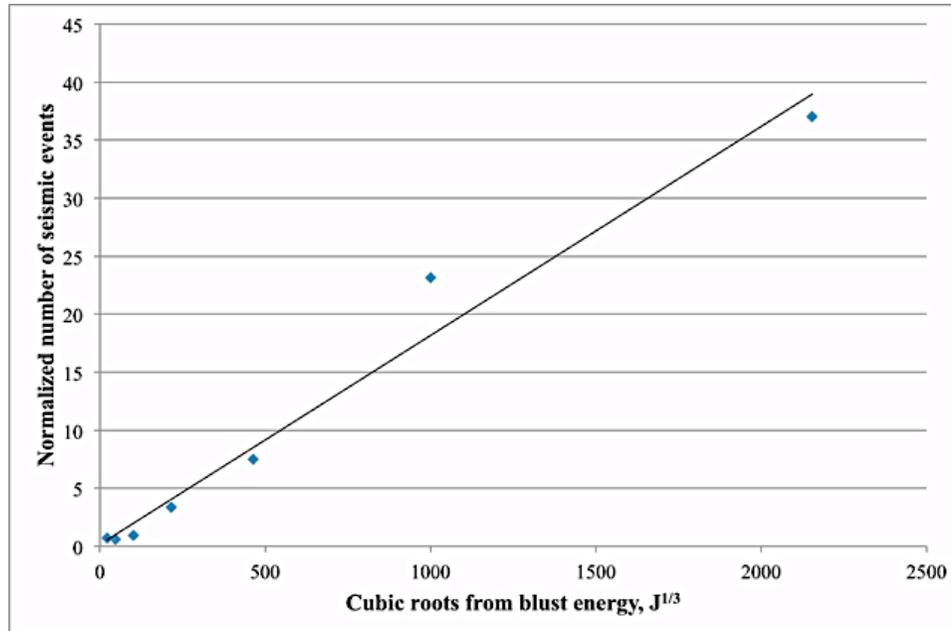
Наличие корреляционных связей между параметрами воздействия и параметрами сейсмического режима



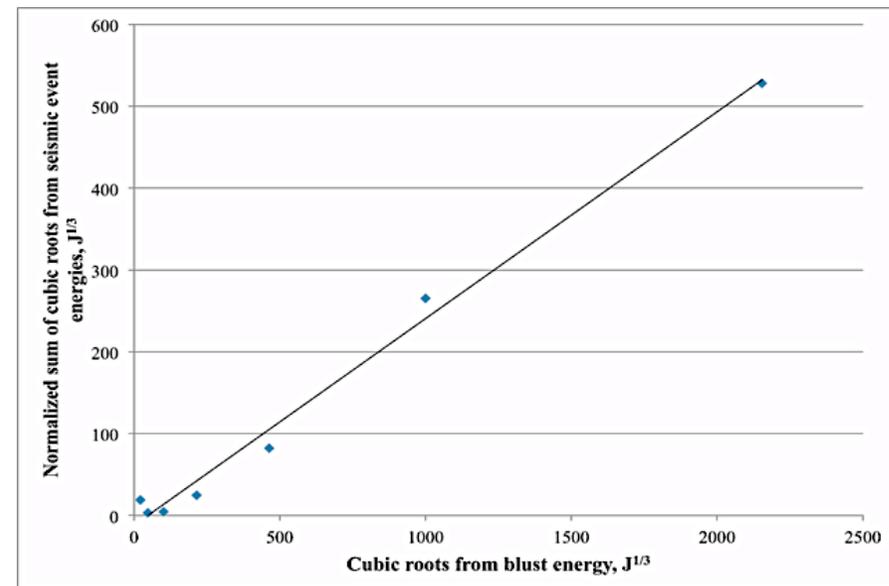
Шахты Воркуты и Таштагола



Наличие корреляционных связей между параметрами воздействия и параметрами сейсмического режима



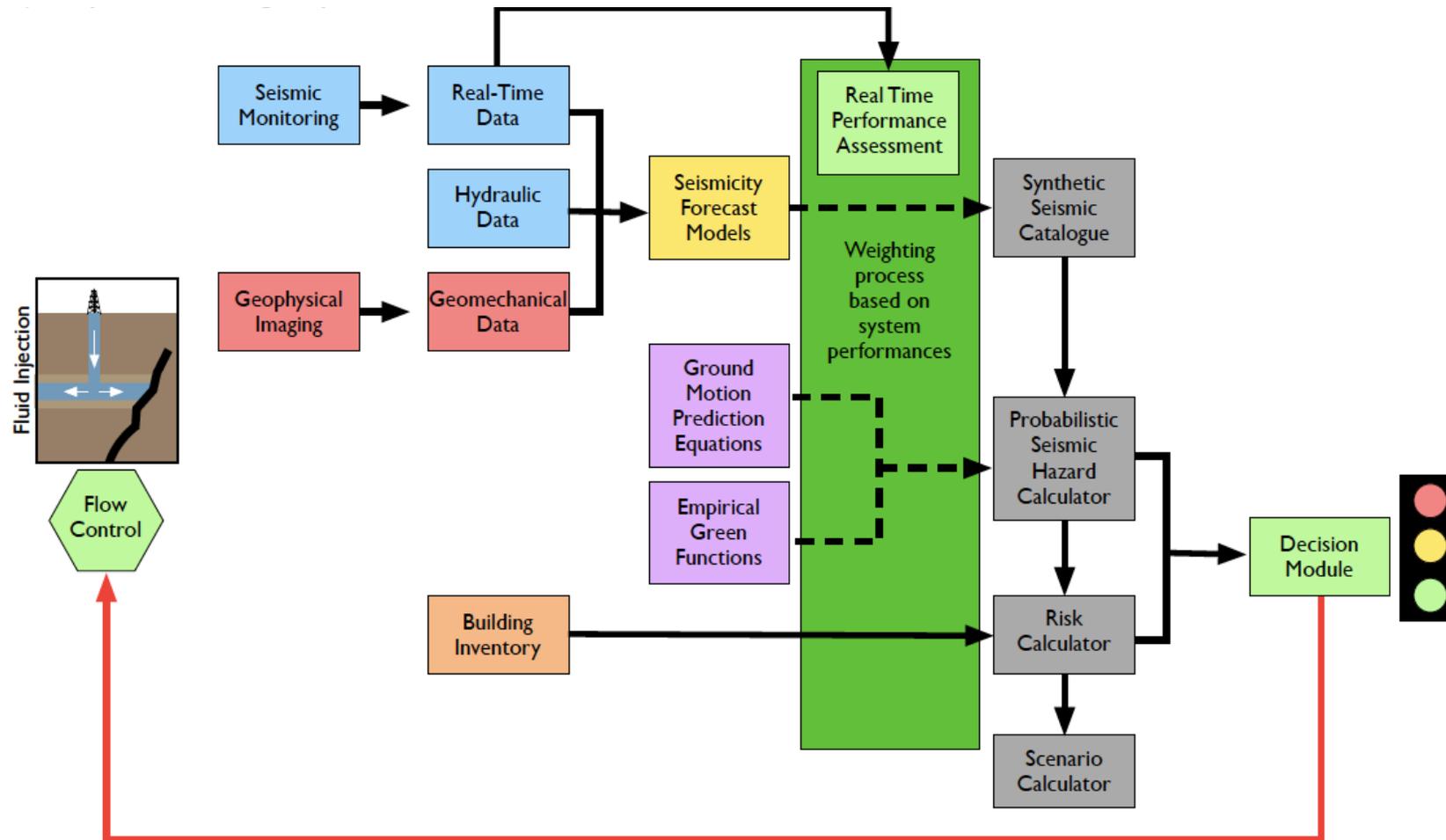
Шахты Таштагола
Связь между энергией взрывов и
сейсмической активностью



Заключение: признаки техногенной природы сейсмичности

1. Угол наклона графиков повторяемости - возрастание
2. Распределение интервалов времени между последовательными сейсмическими событиями (времена ожидания землетрясения) – распределение Вейбула с параметром формы <1 .
3. Пространственная миграция гипоцентров землетрясений (микроземлетрясений) по отношению к области воздействия (приближение – удаление).
4. Наличие детерминированной составляющей, определяемой воздействием.
5. Наличие корреляционных связей между параметрами воздействия (давление, объемы закачки и добычи и т.д.) и параметрами сейсмического режима.

Светофорный принцип принятия решений о продолжении/прекращении воздействий

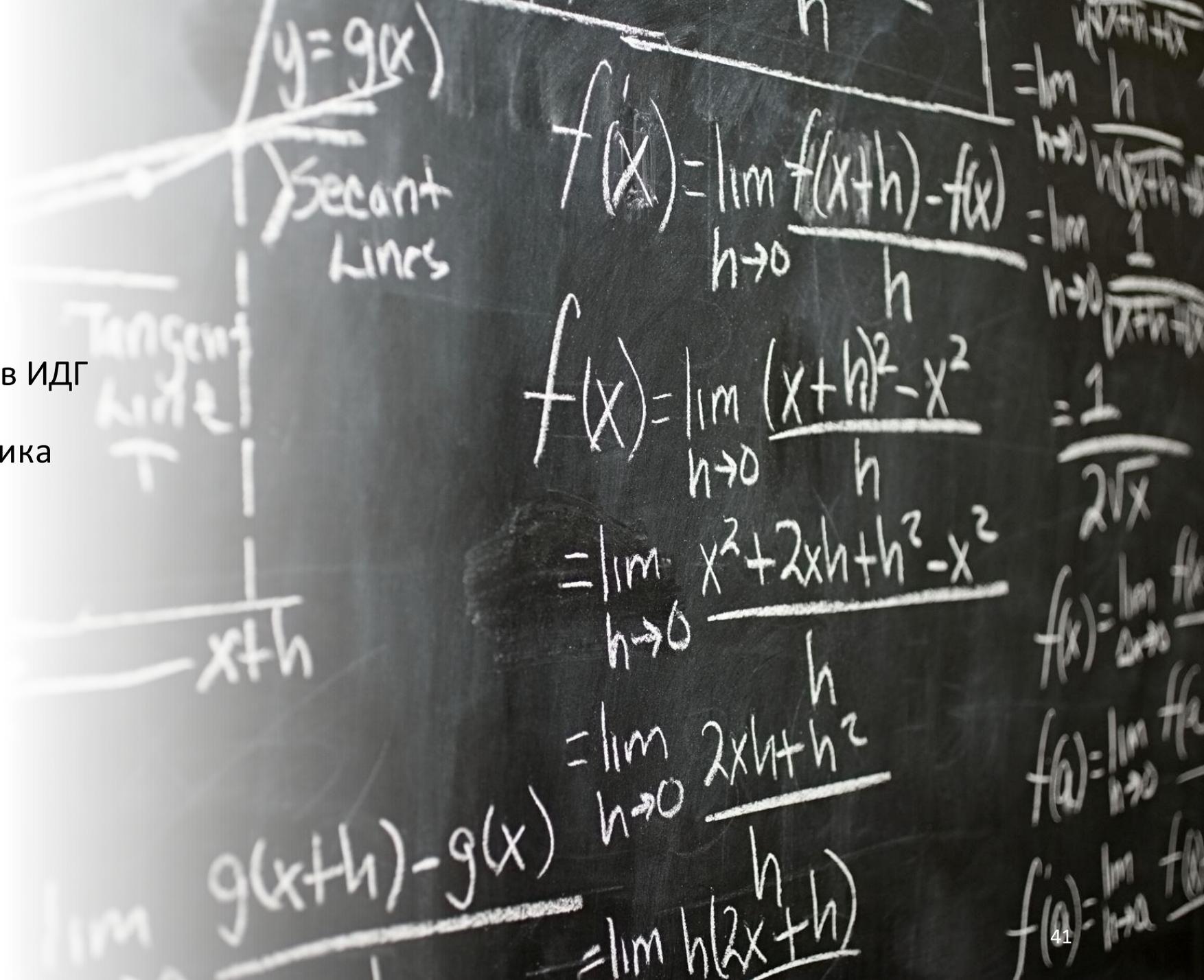


Заключение

- Воздействие на флюидные системы недр приводит к сейсмическим событиям
- Сейсмический/микросейсмический мониторинг является необходимым средством изучения глубинных процессов при воздействии на флюидные системы
- Интерпретация данных мониторинга должна опираться на геомеханические модели движений пористой флюидонасыщенной трещиноватой среды
- Сценарии развития индуцированной сейсмичности сильно зависят от параметров модели. Для настройки модели необходимы предварительные исследования
- Основным критерием техногенных изменений в сейсмическом режиме является наличие корреляций с параметрами воздействия.

Возможности для обучения

- Базовая кафедра МФТИ в ИДГ РАН «Теоретическая и экспериментальная физика геосистем»
- Аспирантура МФТИ
- Аспирантура ИДГ РАН





СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!

idg.ras.ru

