

# Численное моделирование сейсмичности, инициированной закачкой жидкости.



С.Б. Турунтаев  
В.Ю. Рига  
Н.А. Барышников



# 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
- Возможности использования методов машинного обучения для решения задачи о развитии сейсмичности при закачке жидкости
- Заключение

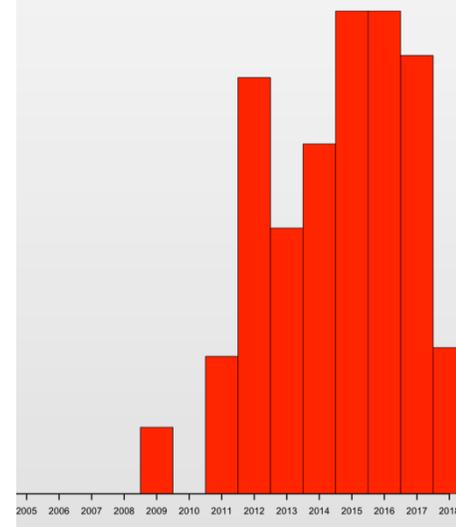
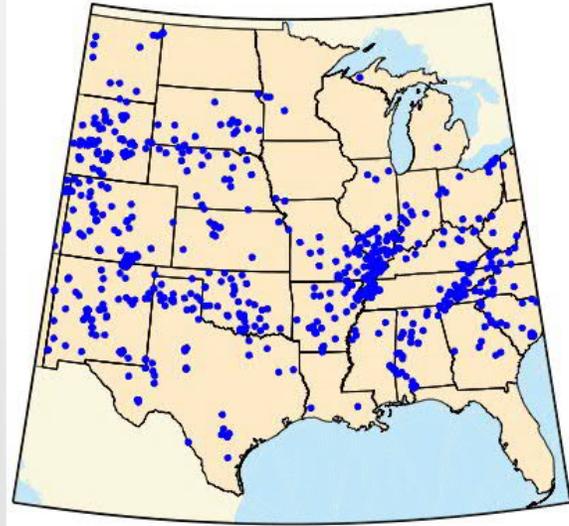
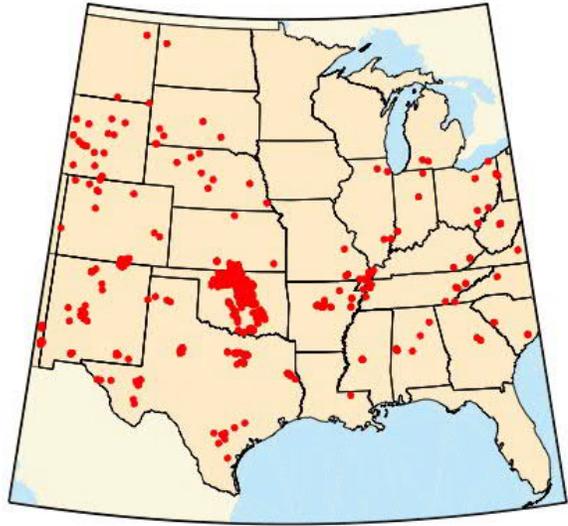
# Денверские землетрясения



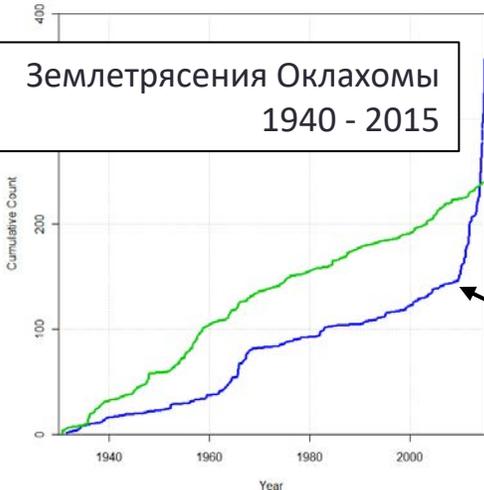
# Усиление сейсмической активности при разработке сланцевых месторождений нефти, США

2009-2015 361  $M \geq 3$  /год

1973-2008 24  $M \geq 3$  /год



Землетрясения Оклахомы  
1940 - 2015

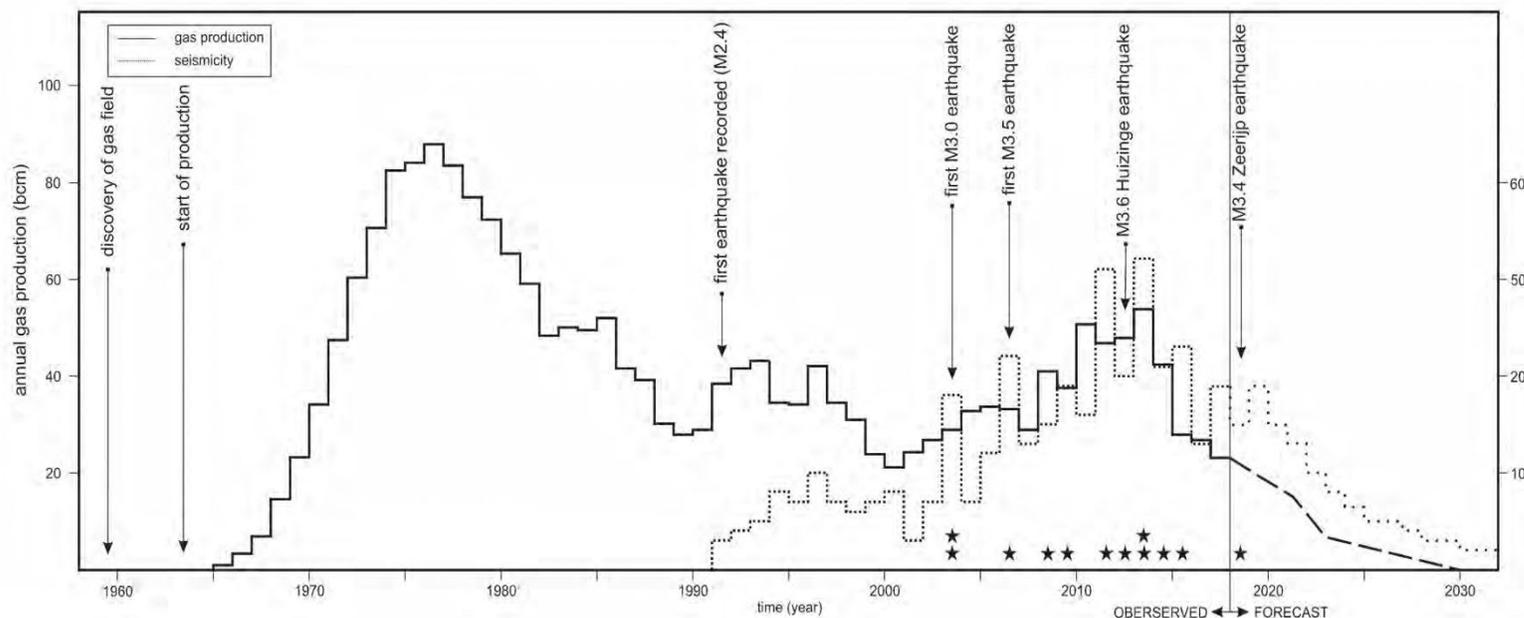


*William L. Ellsworth et al.*  
*Stanford Centre for Induced and Triggered Seismicity*

Рост сейсмичности в  
результате разработки  
сланцевых месторождений

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. 4

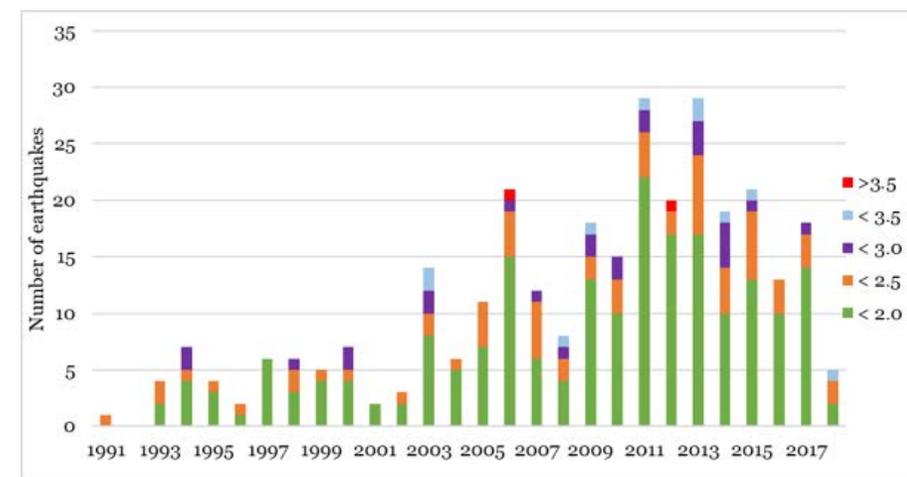
# Добыча газа и сейсмичность месторождения Гронинген, Нидерланды



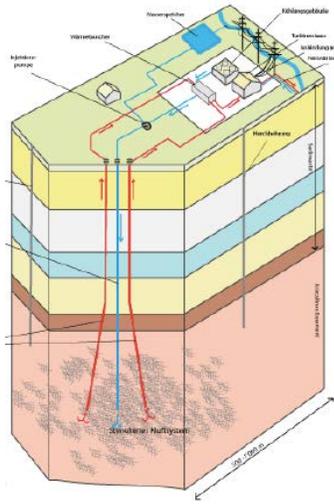
Sintubin 2018

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

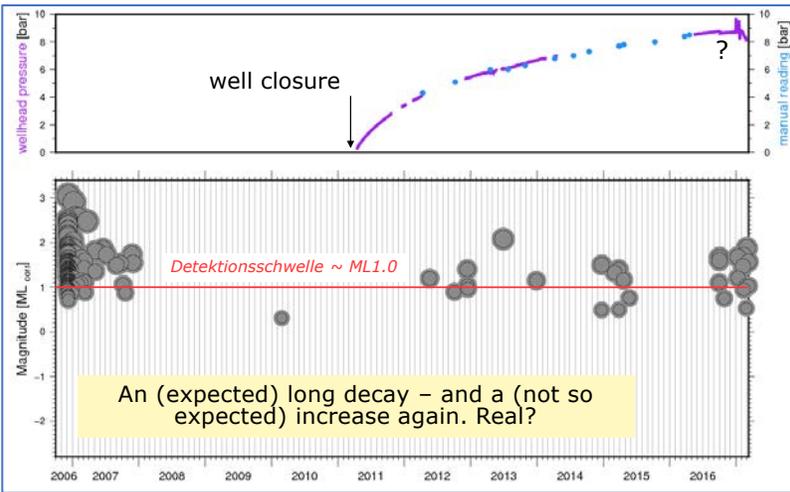
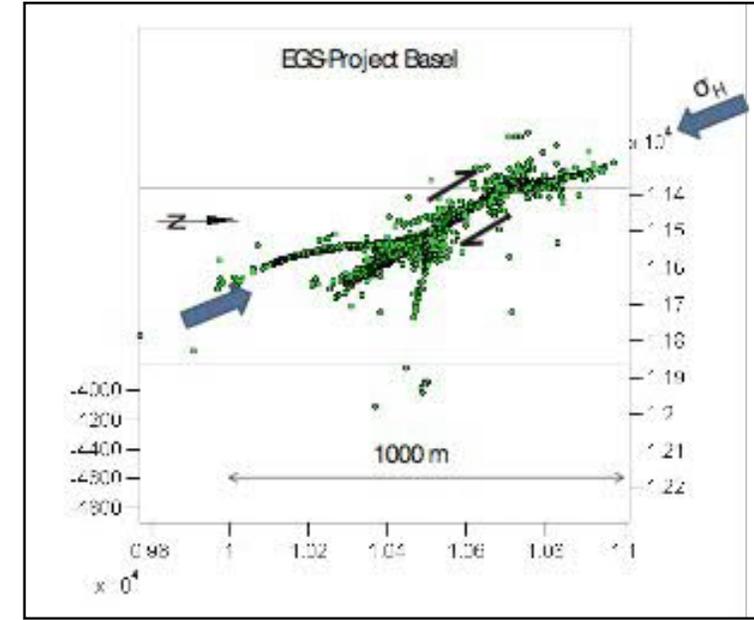
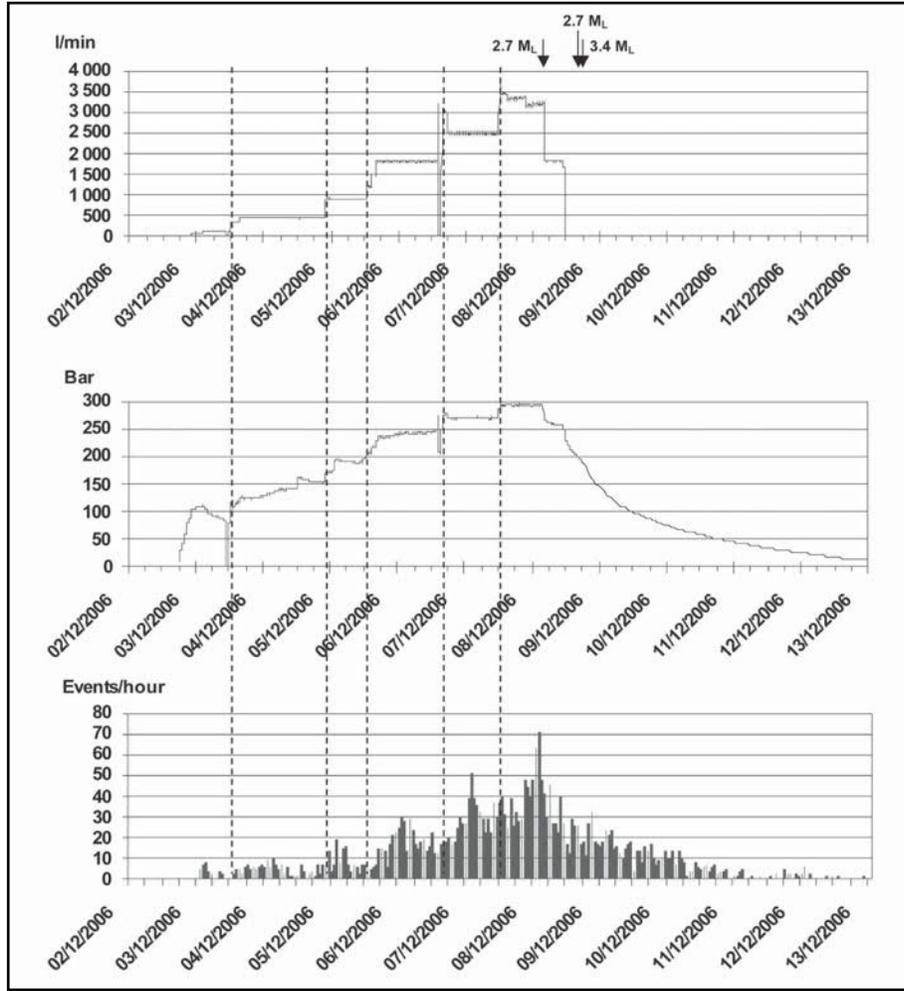
Месторождение было открыто в 1959 году на севере Нидерландов. С тех пор было добыто свыше 1,5 трлн куб. м, а остаточные запасы оцениваются в 2,7 трлн куб. м. С начала 1990-х район месторождения пережил более 900 землетрясений магнитудой до 3,6.



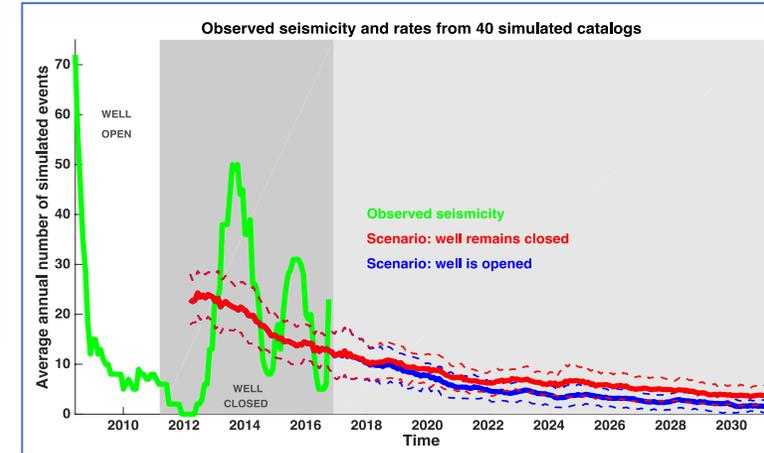
# Базельский геотермальный проект



Basel (2006)  
(EGS)



Stefan Wiemer, Induced seismicity workshop, Davos, 2017



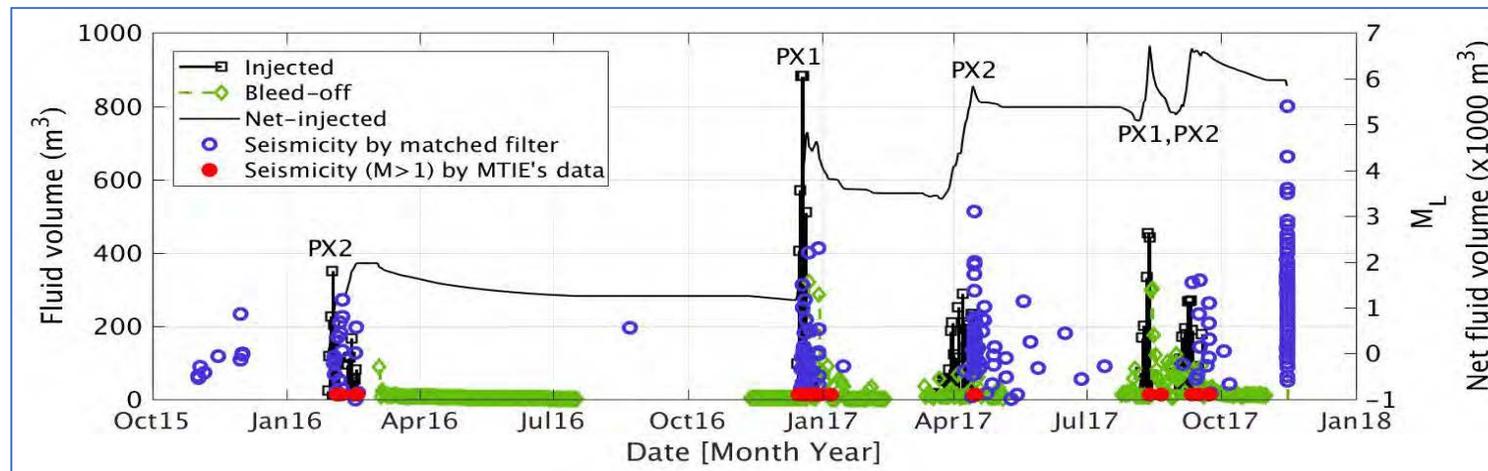
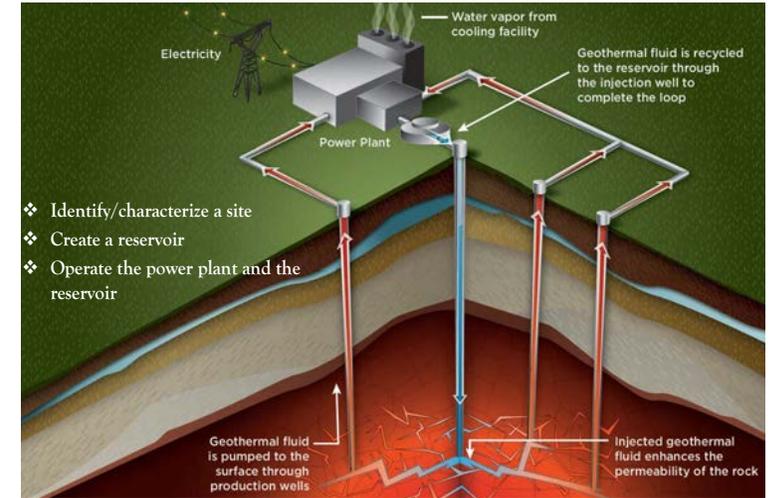
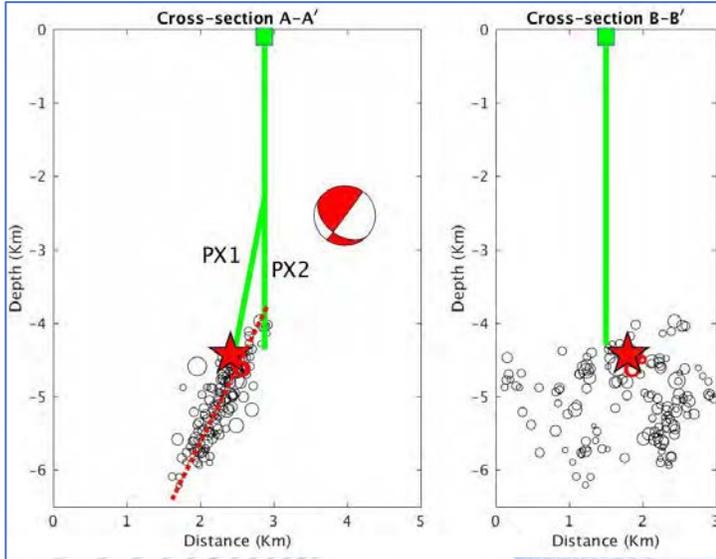
# Землетрясение M=5.4 Pohang, Южная Корея, 15.11.2017

135 потерпевших  
297 млн. долларов ущерб  
4.5 км глубина гипоцентра

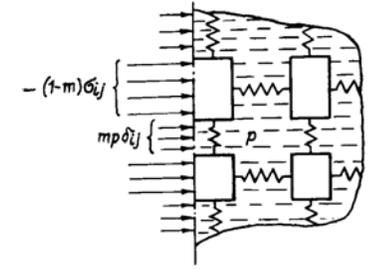


Kwang-Hee Kim<sup>1\*</sup>, Jin-Han Ree<sup>2\*</sup>, YoungHee Kim<sup>3</sup>,  
Sungshil Kim<sup>2</sup>, Su Young Kang<sup>1</sup>, Wooseok Seo<sup>1</sup>

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



# Физика сейсмичности при изменении порового давления

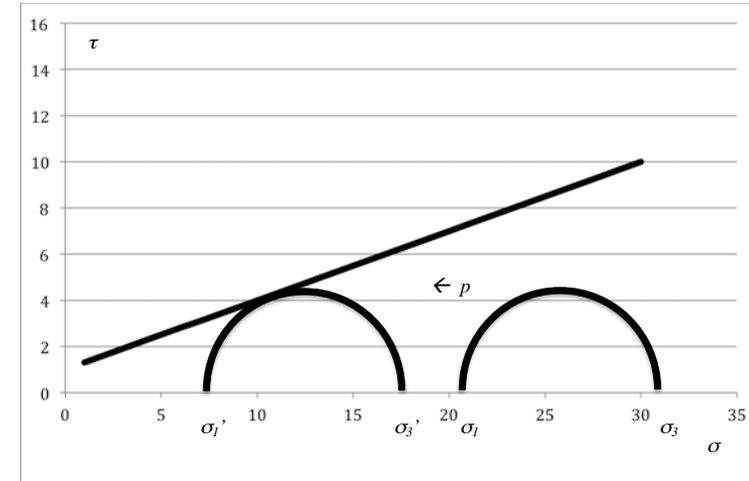


- Основным параметром, ответственным за появление сейсмических событий при закачке жидкости, является поровое давление.
- Достижение поровым давлением жидкости некоторой критической величины, значение которой зависит от величин главных сжимающих напряжений и ориентации естественной трещиноватости, принимается 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:

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

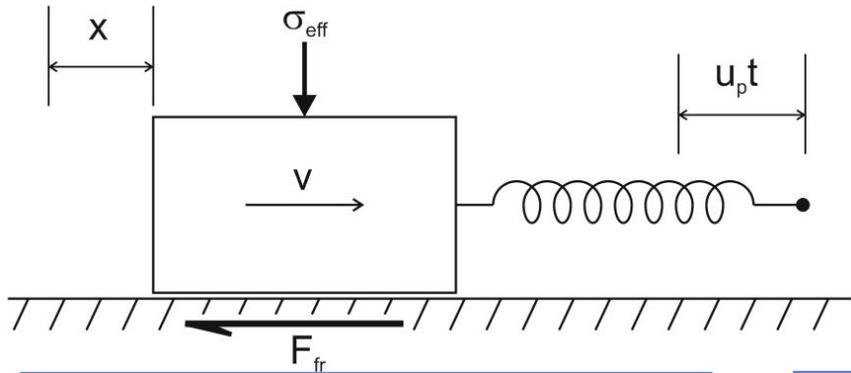
$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta$$

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



- где  $\tau$  - касательное напряжение,  $\tau_0$  - сцепление (прочность на сдвиг),  $\sigma_n$  - нормальная по отношению к рассматриваемой площадке компонента напряжений,  $\sigma_1, \sigma_3$  - максимальное и минимальное главные напряжения,  $p$  - поровое давление жидкости,  $\theta$  - угол между направлением действия максимального главного напряжения и нормалью к площадке,  $\mu$  - коэффициент внутреннего трения.

# Закон трения rate-and-state



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

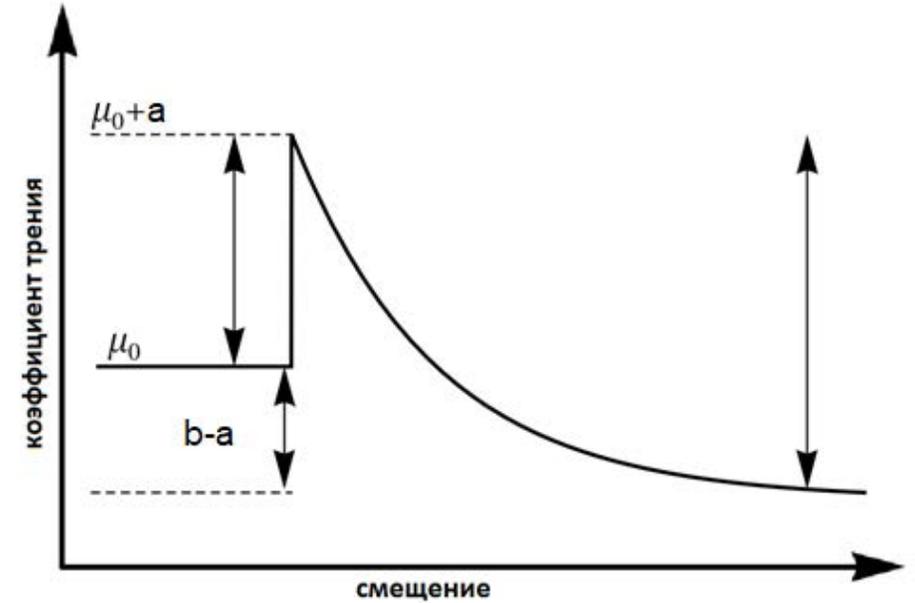
$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v^*}\right) + b \ln\left(\frac{v^*\theta}{L}\right)$$

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

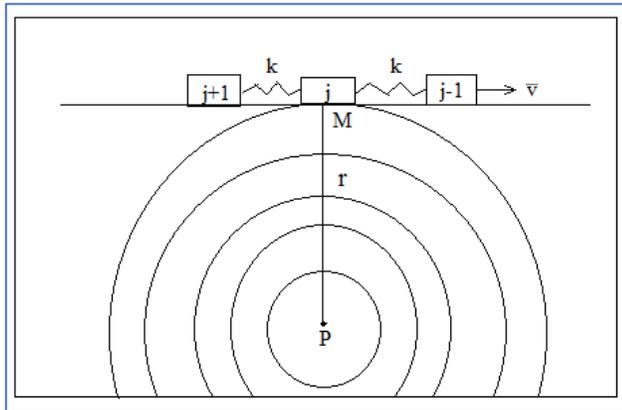
$k_{cr}$  – критическое значение жесткости, определяемое параметрами закона трения

Sergey B Turuntaev, Vasily Y Riga. Non-linear effects of pore pressure increase on seismic event generation in a multi-degree-of-freedom rate-and-state model of tectonic fault sliding. // Nonlin. Processes Geophys., 24, 215–225, 2017  
doi:10.5194/npg-24-215-2017

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



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

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

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

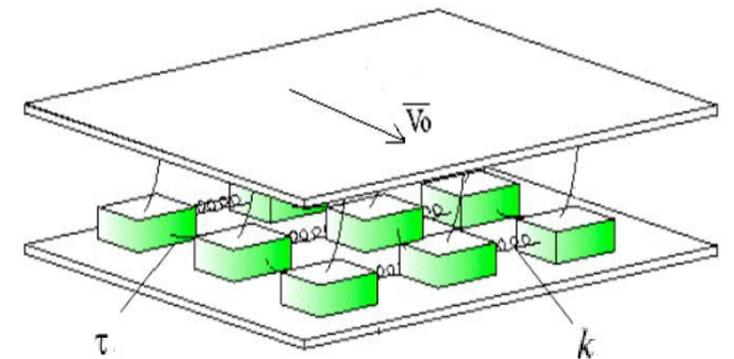
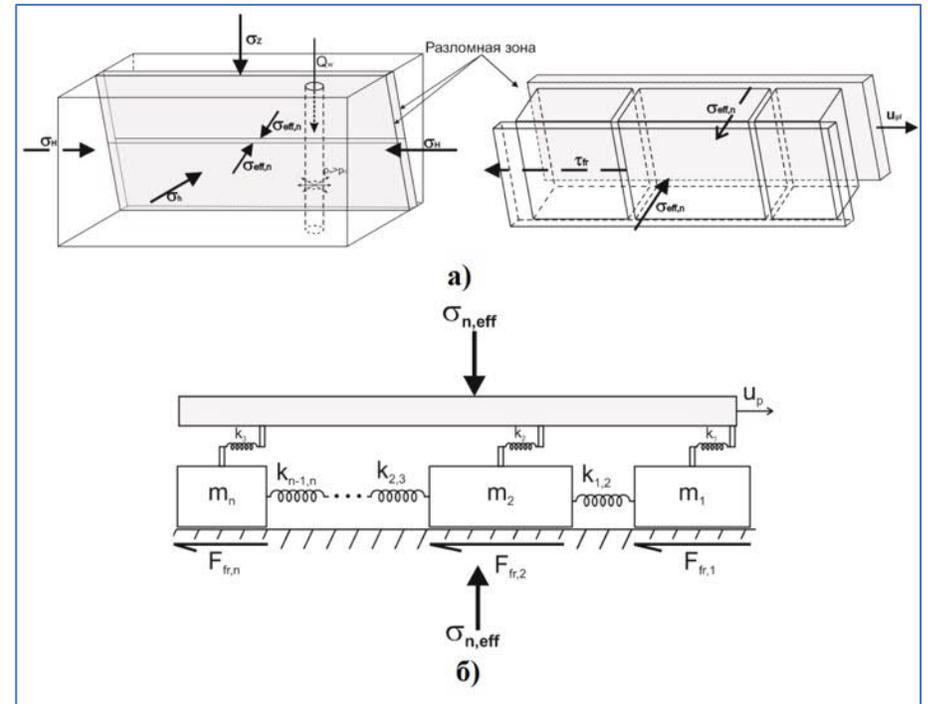
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(v_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_{fr1} \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(v_0 t - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - F_{fr2} \\ \dots \end{cases}$$

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

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

$$M_0 = G \int D dS$$

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



(Brace, Byerlee, 1966; Burrige & 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)

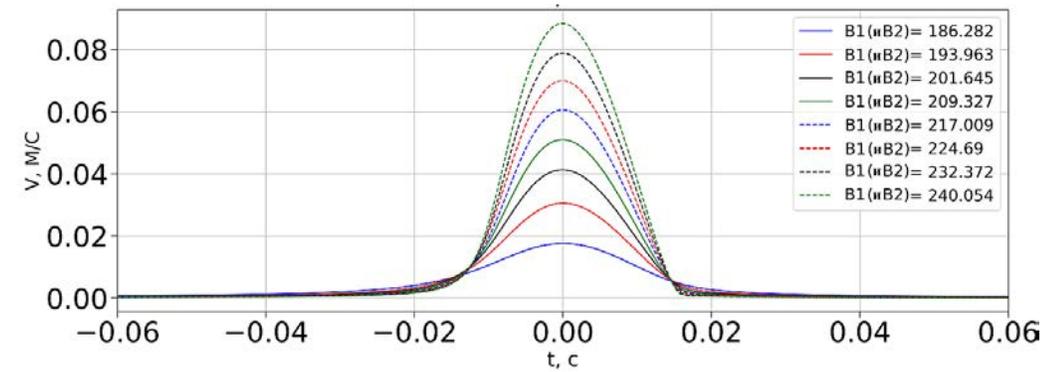
# Выбор вида закона трения



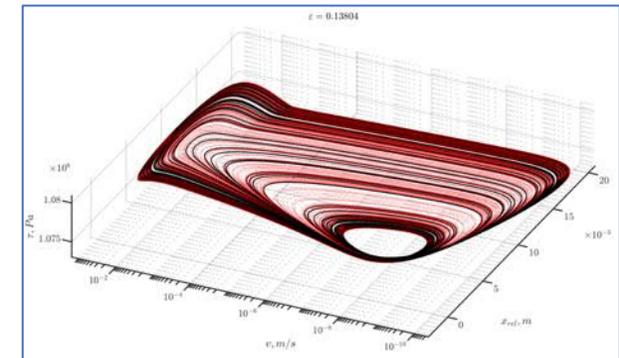
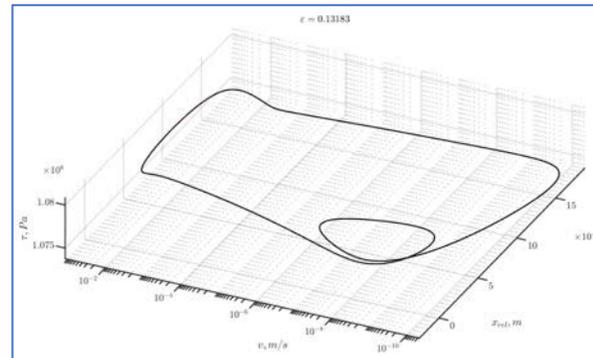
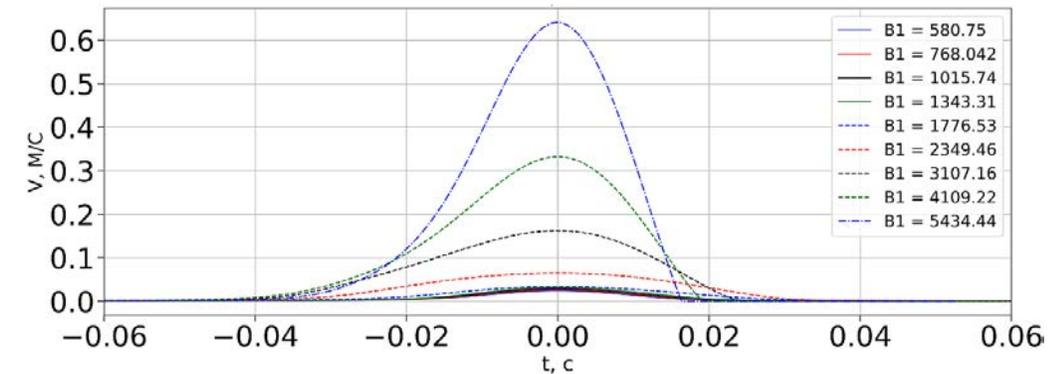
*G.G. Kocharyan, V.K. Markov, A.A. Ostapchuk et al. // Phys Mesomech – 2014 – 17(2) – pp. 123-133.*

Конкретный вид эволюции параметра  $\vartheta$  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

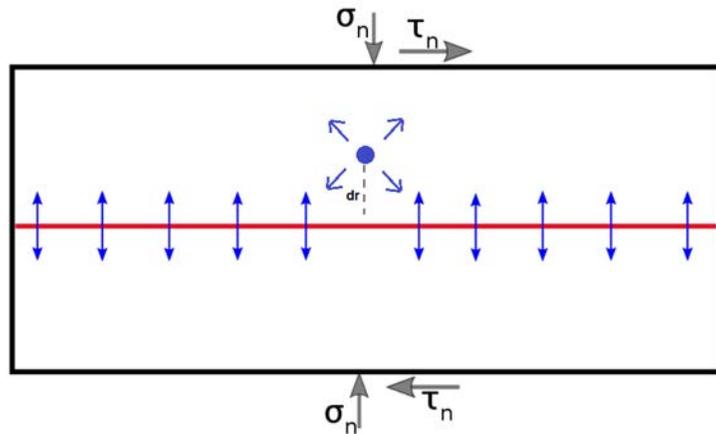
*Sergey B Turuntaev, Vasily Y Riga. Non-linear effects of pore pressure increase on seismic event generation in a multi-degree-of-freedom rate-and-state model of tectonic fault sliding. // Nonlin. Processes Geophys., 24, 215–225, 2017 doi:10.5194/npg-24-215-2017*



Характерный профиль скорости при скольжении блока

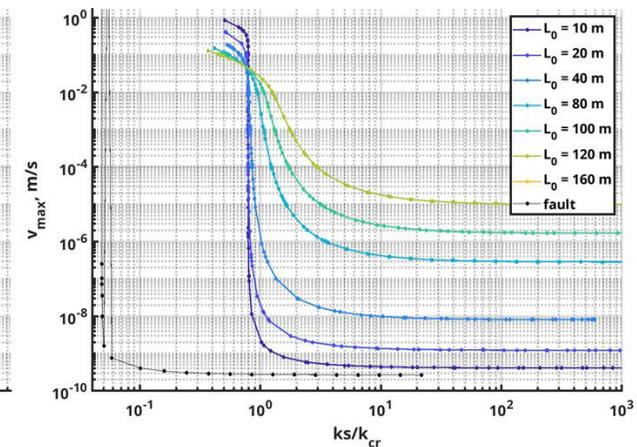
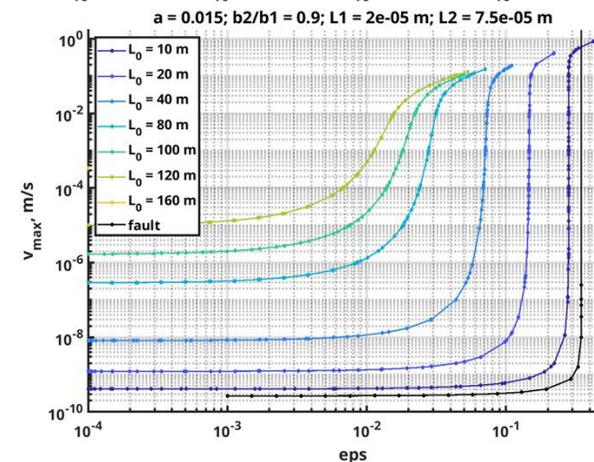
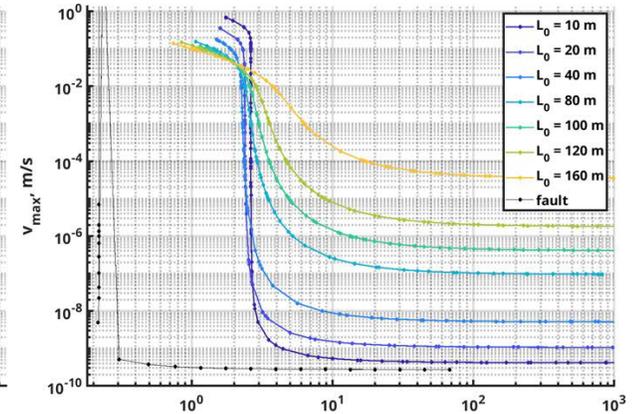
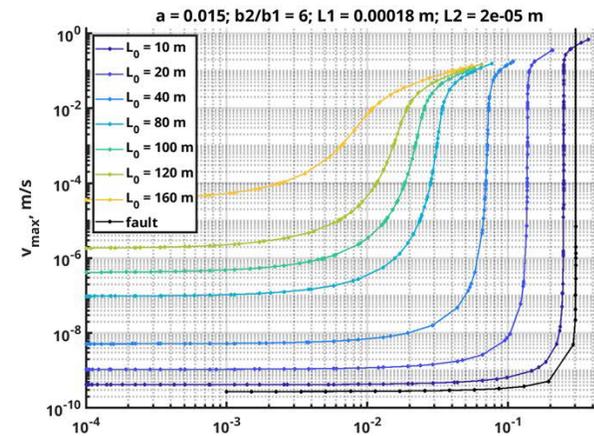


# Переход от асейсмического скольжения к сейсмическому.



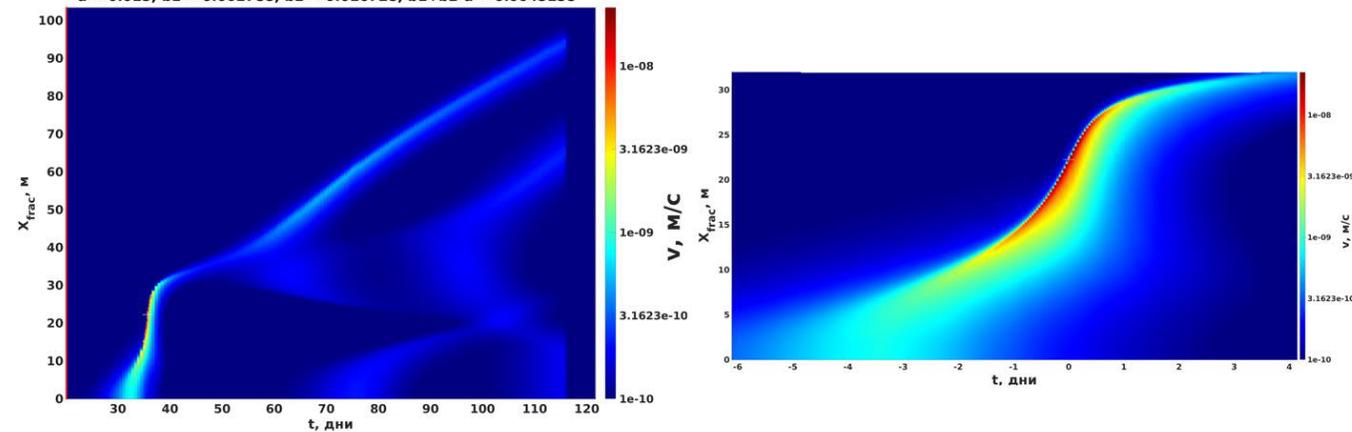
Рассматривается единичный разлом в бесконечной однородной упругой слабопроницаемой среде (0.01 мД), вблизи которого производится закачка воды (с постоянным расходом равным 23 л/час). Закачка проводилась до момента, пока общий объем закачанной жидкости не достигал значения 60 м<sup>3</sup>, зачем закачка останавливалась. Размер расчетной области 6 км на 10 км. Разлом высокопроницаем, его проницаемость растет по мере увеличения порового давления. Нормальное напряжение на разломе было равно 64 МПа.

В серии расчетов постепенно увеличивался параметр  $\varepsilon = \frac{b_1 + b_2 - a}{a}$ , отвечающий за степень разупрочнения разлома, при прочих фиксированных параметрах.

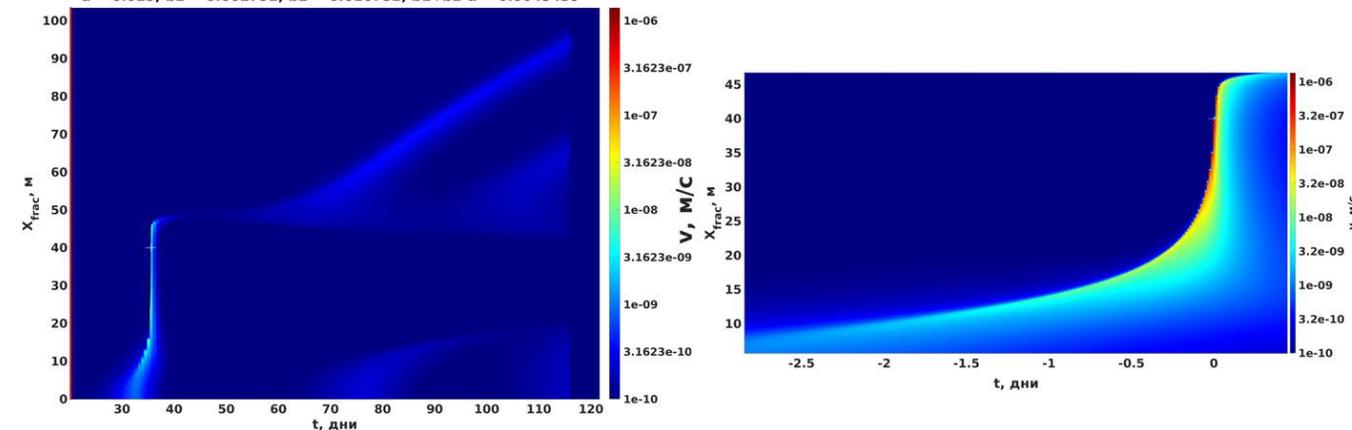


Зависимость максимальной достигаемой скорости скольжения от величины  $\varepsilon$ . Результаты расчета для модельного разлома с разной заданной длиной

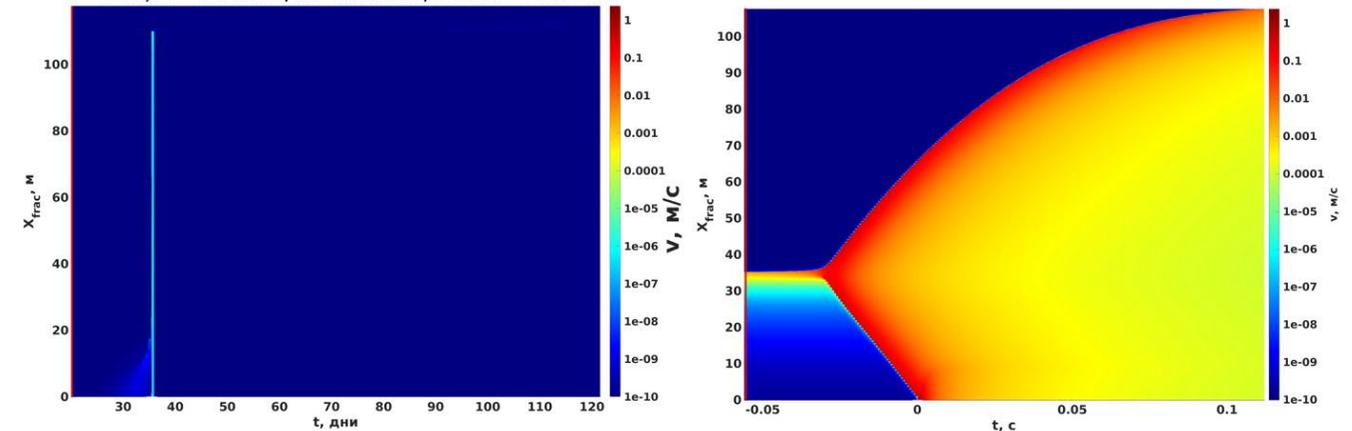
$a = 0.015; b_1 = 0.002788; b_2 = 0.016728; b_1+b_2-a = 0.0045158$



$a = 0.015; b_1 = 0.002792; b_2 = 0.016752; b_1+b_2-a = 0.0045439$



$a = 0.015; b_1 = 0.0027921; b_2 = 0.0167529; b_1+b_2-a = 0.0045450$



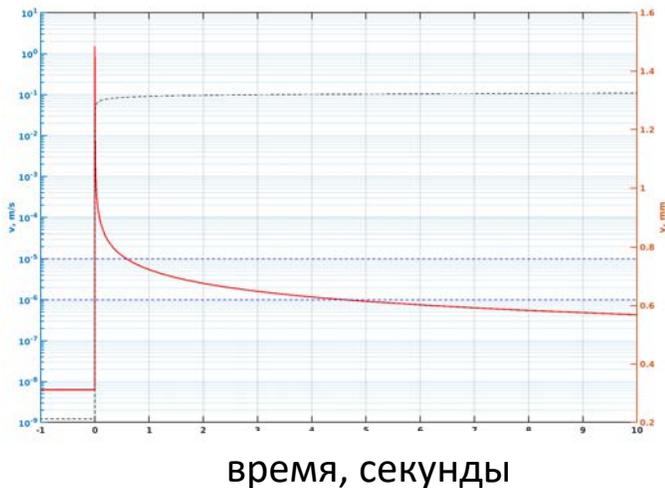
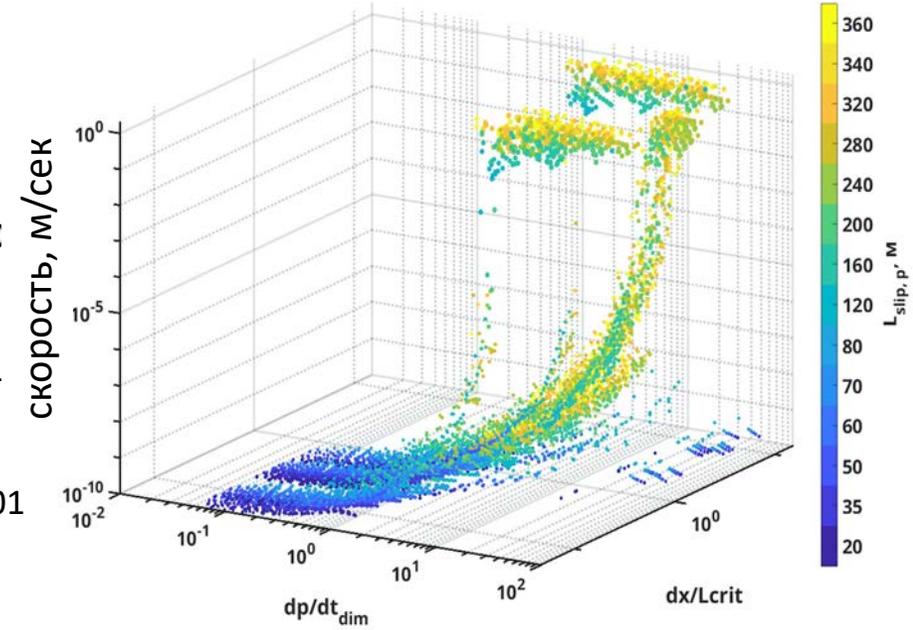
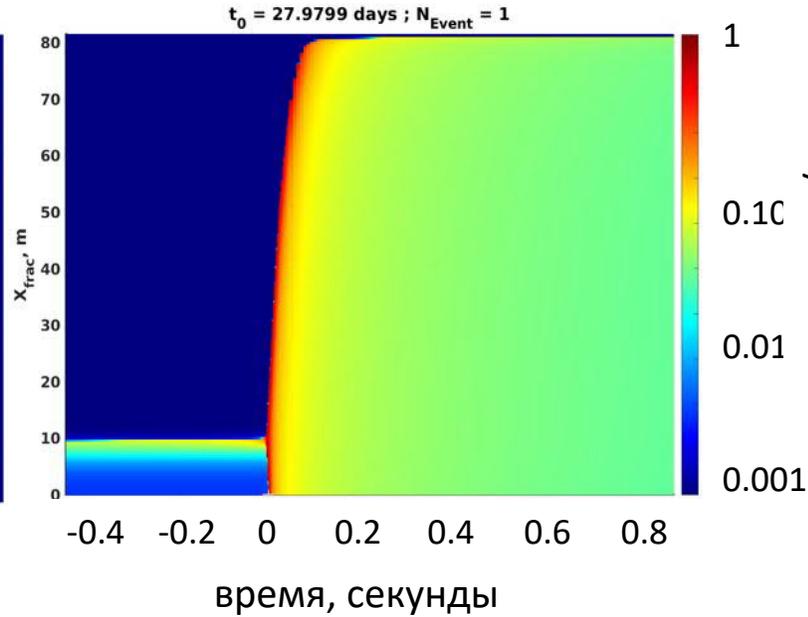
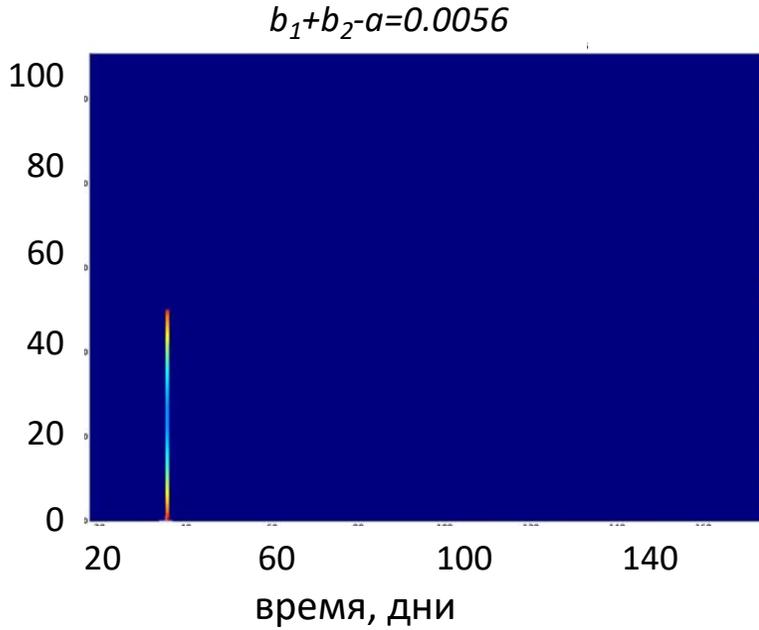
Переход от асейсмического скольжения к сейсмическому.

Пример динамики скольжения разлома во времени. В силу симметрии представлена половина разлома. Левый график – изменение распределения скорости скольжения вдоль разлома во времени. Правый график - изменение распределения скорости скольжения вдоль разлома во времени в увеличенном масштабе.

При увеличении  $\varepsilon$  зона, где развивается самое быстрое скольжение, становится все уже во временных координатах, точка расположения максимального скольжения на разломе смещается от центра, пока в какой-то момент не происходит качественный скачок, и подвижка не становится сейсмической

# Развитие сейсмического режима скольжения тектонического разлома при закачке жидкости

Расстояние от центра разлома, м

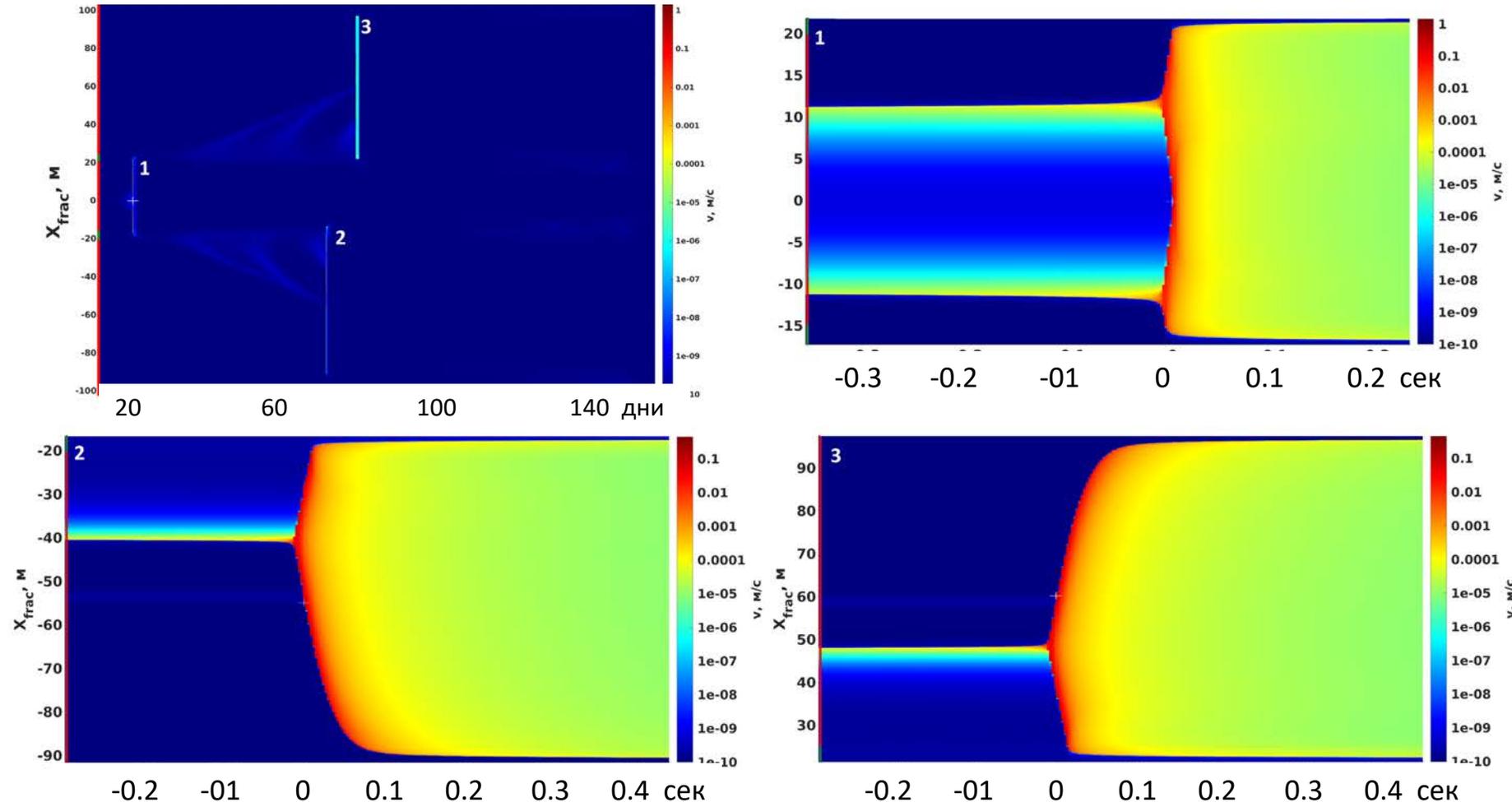


Сейсмическое движение по разлому при закачке жидкости: ось x – время от начала закачки в днях; ось y – положение точки разлома, в которой в данный момент времени достигается максимальная скорость скольжения; цветом показано значение максимальной скорости скольжения в данном месте в данное время

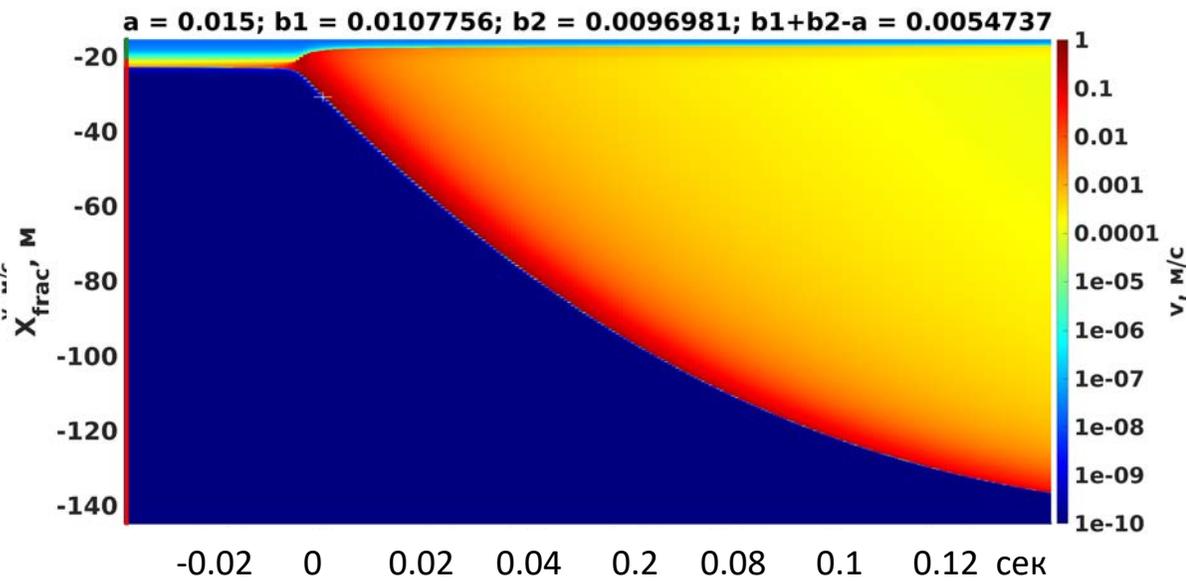
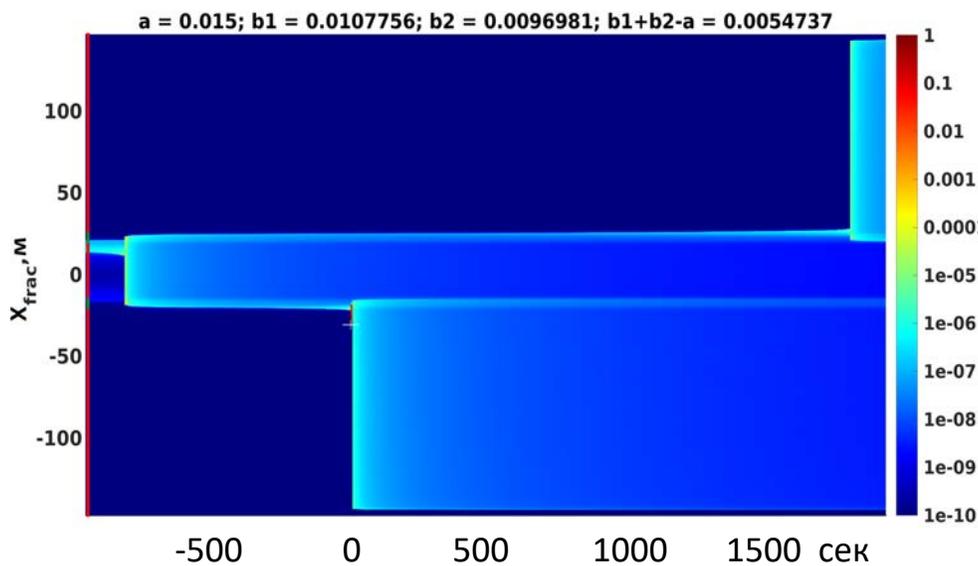
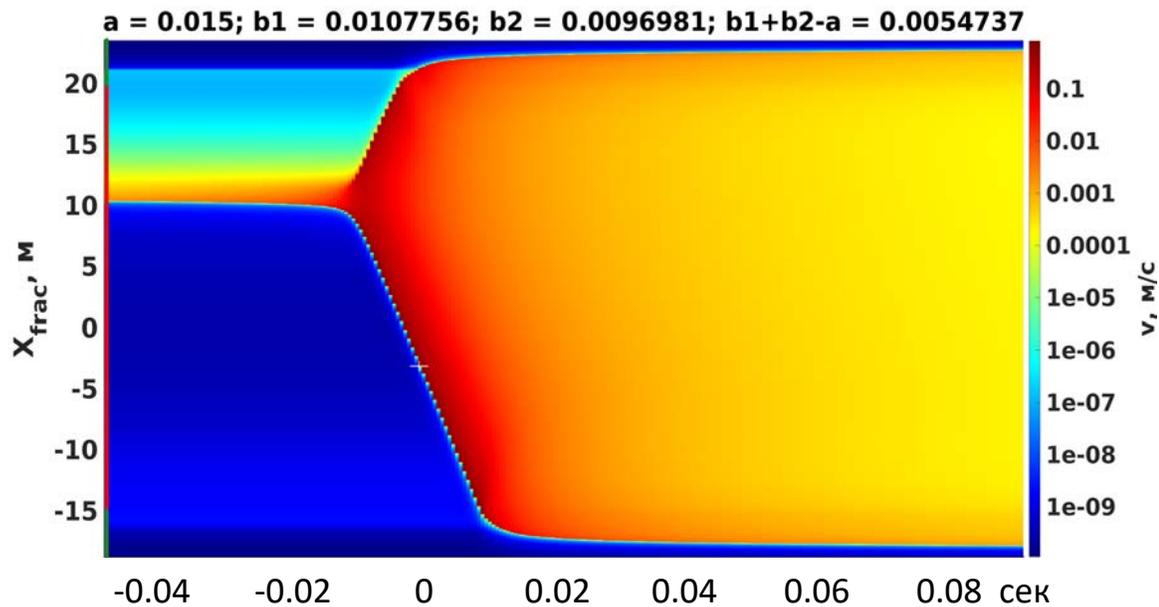
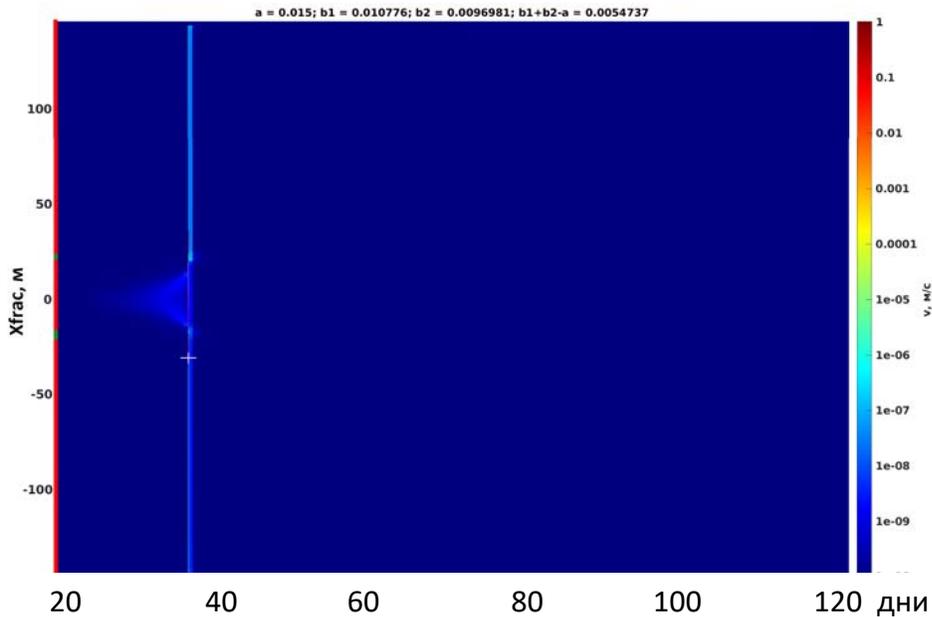
Зависимость максимальной скорости скольжения от скорости изменения давления и длины зоны, на которой нарушается критерий Кулона. Каждая точка соответствует одному расчету. Цвет соответствует задаваемой длине разлома, на которой нарушается критерий Кулона только за счет роста давления.

# Влияние неоднородностей разлома на развитие сейсмической подвижки

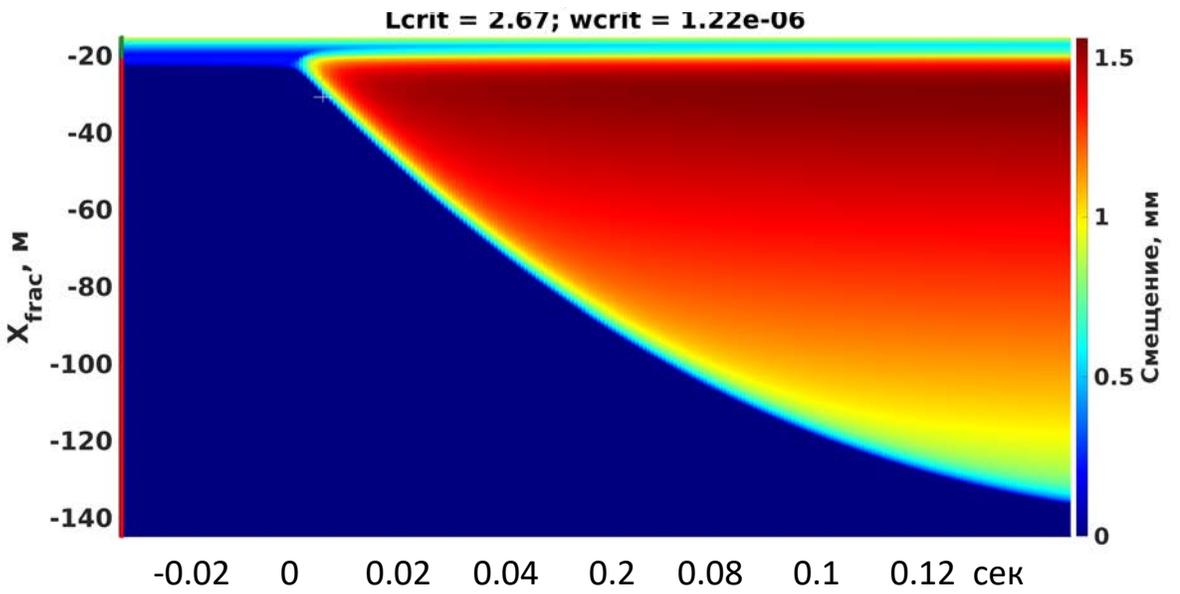
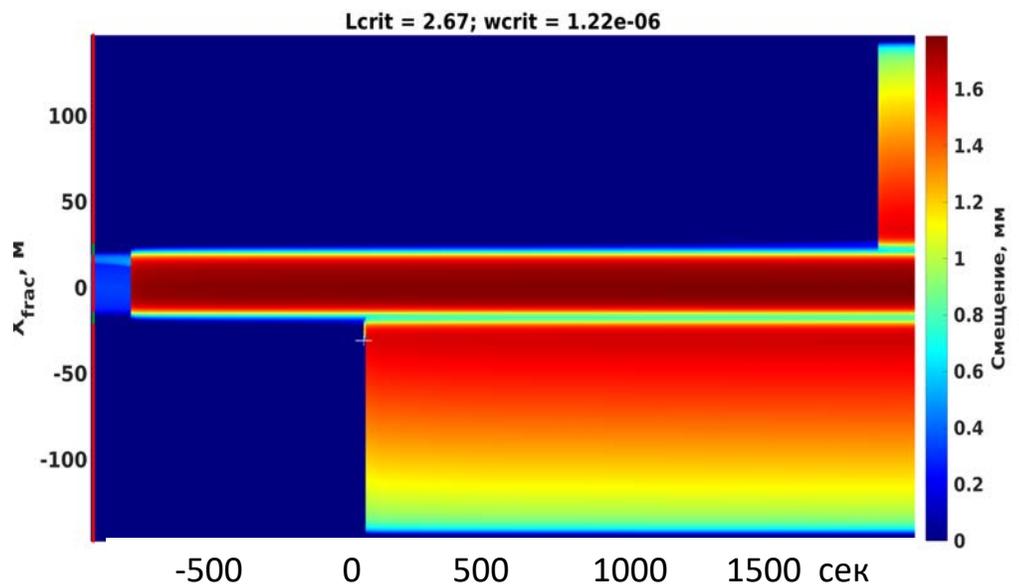
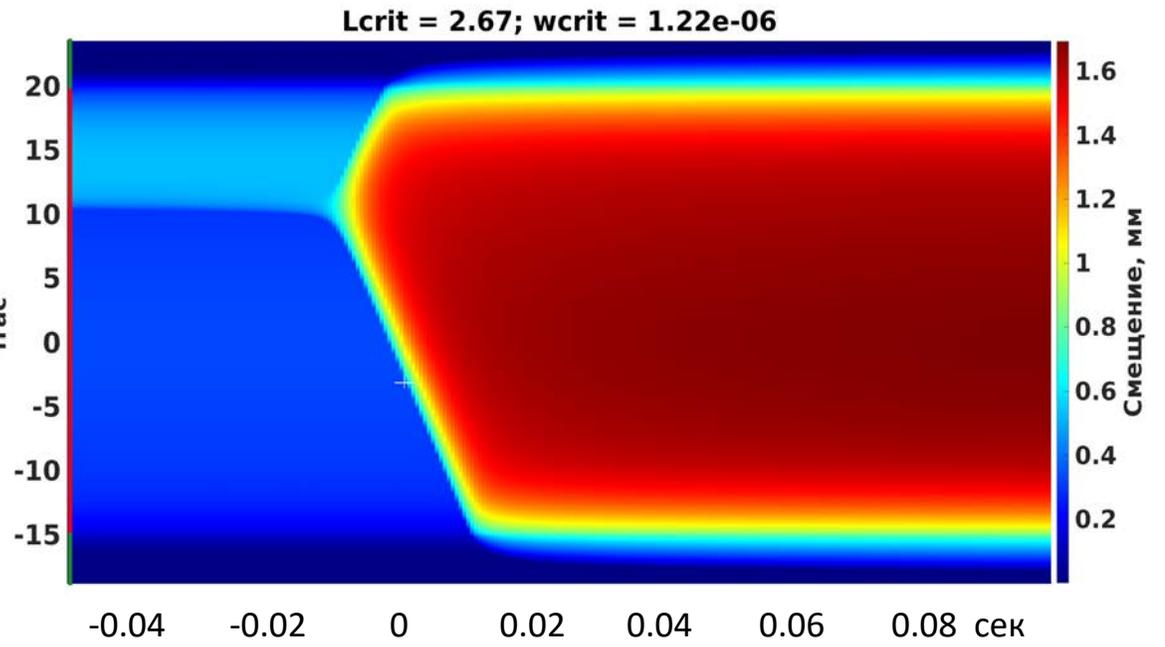
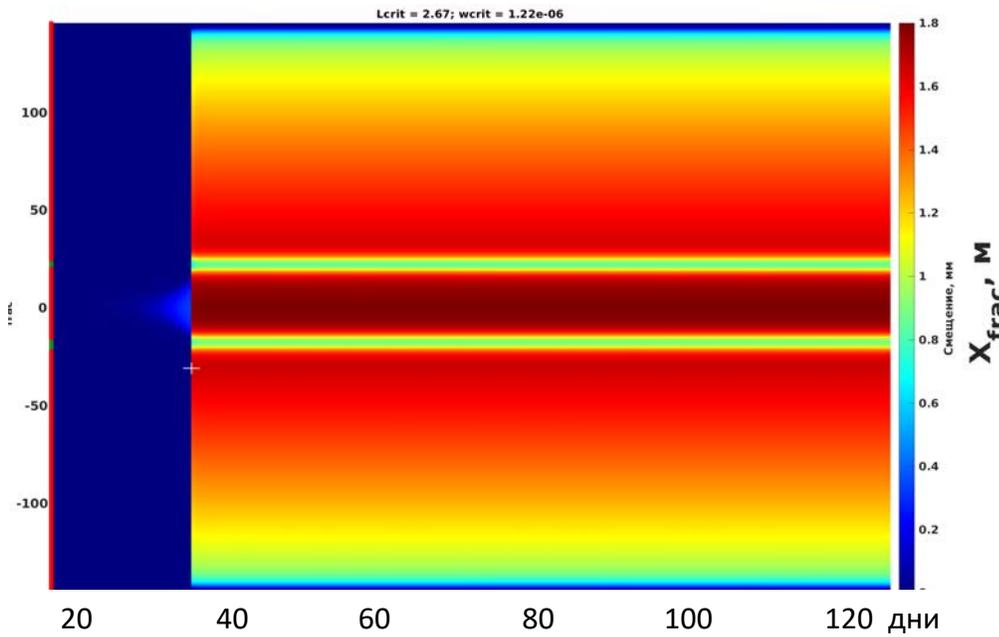
На разломе присутствуют две зоны упрочнения:  $-20 \leq x \leq -15$  и  $20 \leq x \leq 25$ :



Рассмотрен случай, когда разлом включает в себя зоны упрочнения ( $b_1 + b_2 - a < 0$ ). Показано, что даже небольшая зона упрочнения останавливает распространение возмущения, это может приводить к последовательности из нескольких сейсмических подвижек вне этих зон.



Скорости подвижек в разном масштабе времени



Смещения по разлому в разном масштабе времени

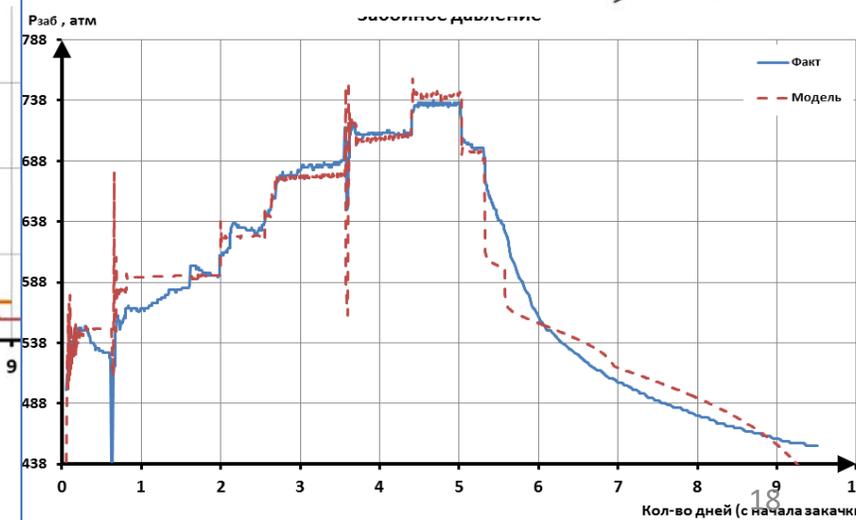
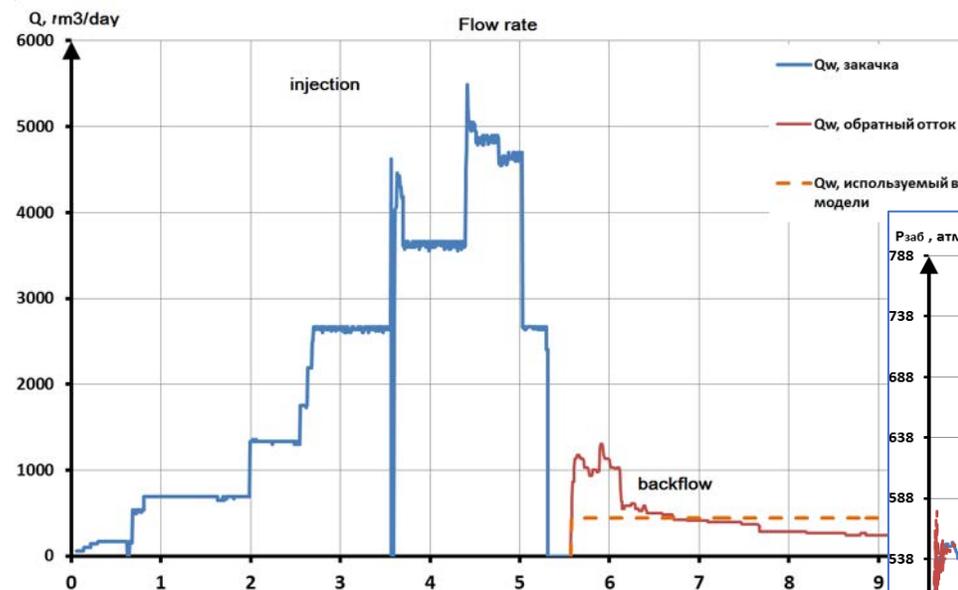
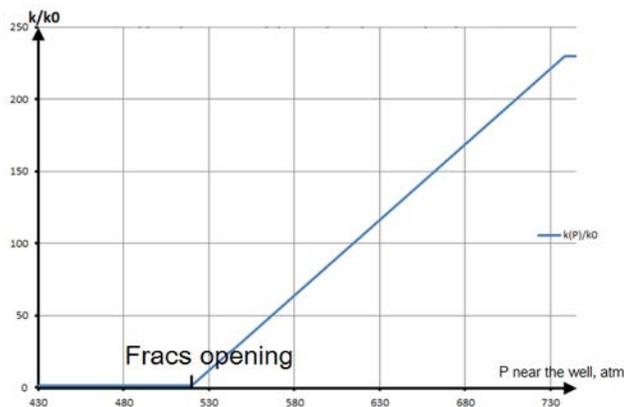
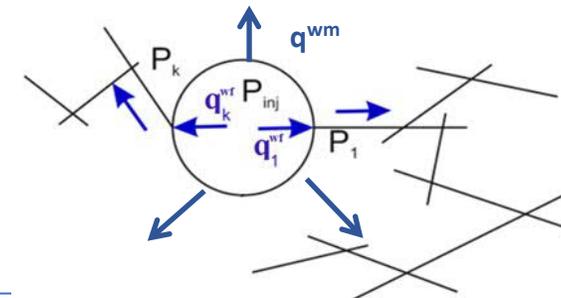
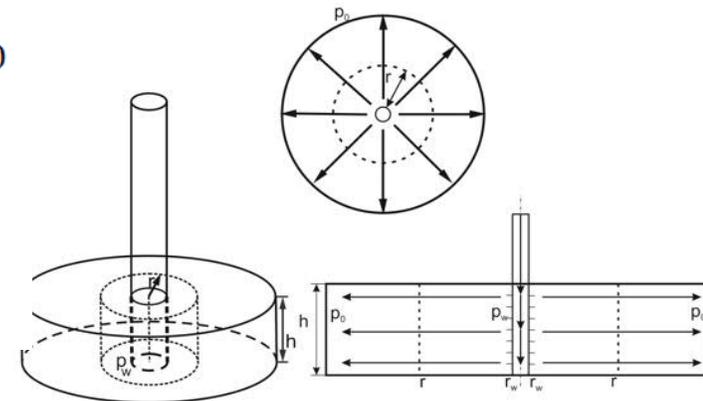
# Применение упрощенной модели для случая Базеля

Изменение давления в результате закачки жидкости (фильтрация радиальная):

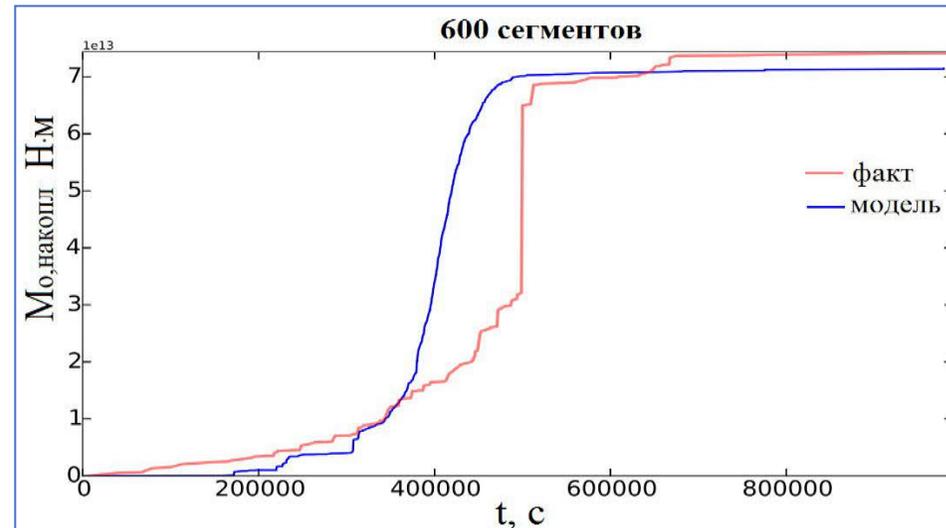
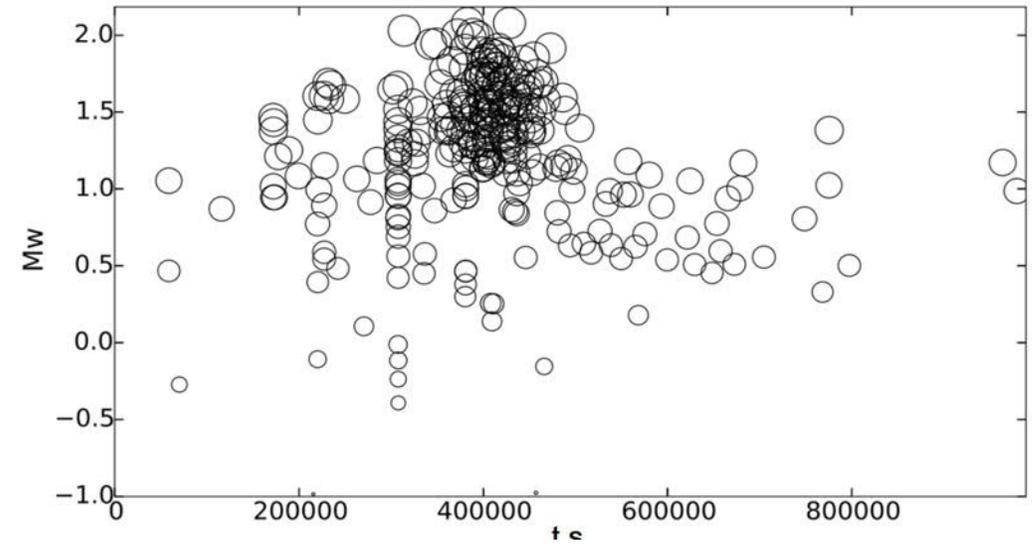
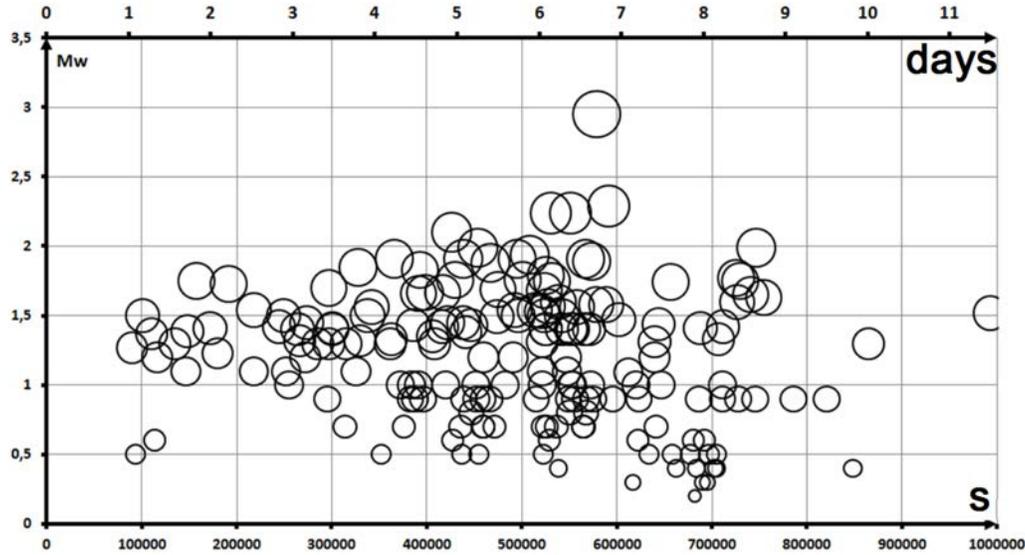
$$p = \frac{Q_0 \mu}{4\pi k h} Ei\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) + p_0$$

Значения параметров взяты близкими к параметрам, характеризовавшим систему скважина-резервуар проекта Базель (Häring et al., 2008, Dinske, 2010):  $r = 100$  м,  $Q_0 = 1.5$  м<sup>3</sup>/мин,  $p_0 = 44$  МПа,  $\mu = 0.284$  Па·с,  $h = 46$  м,  $k = 4$  мД

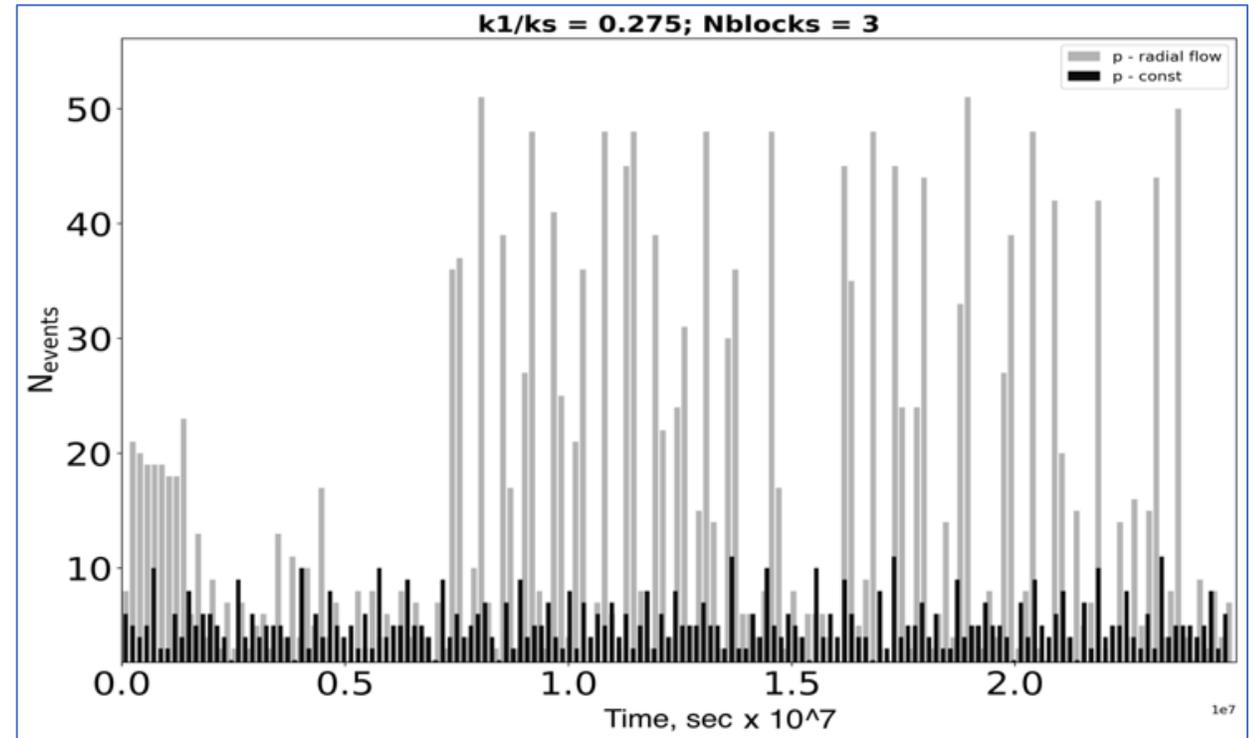
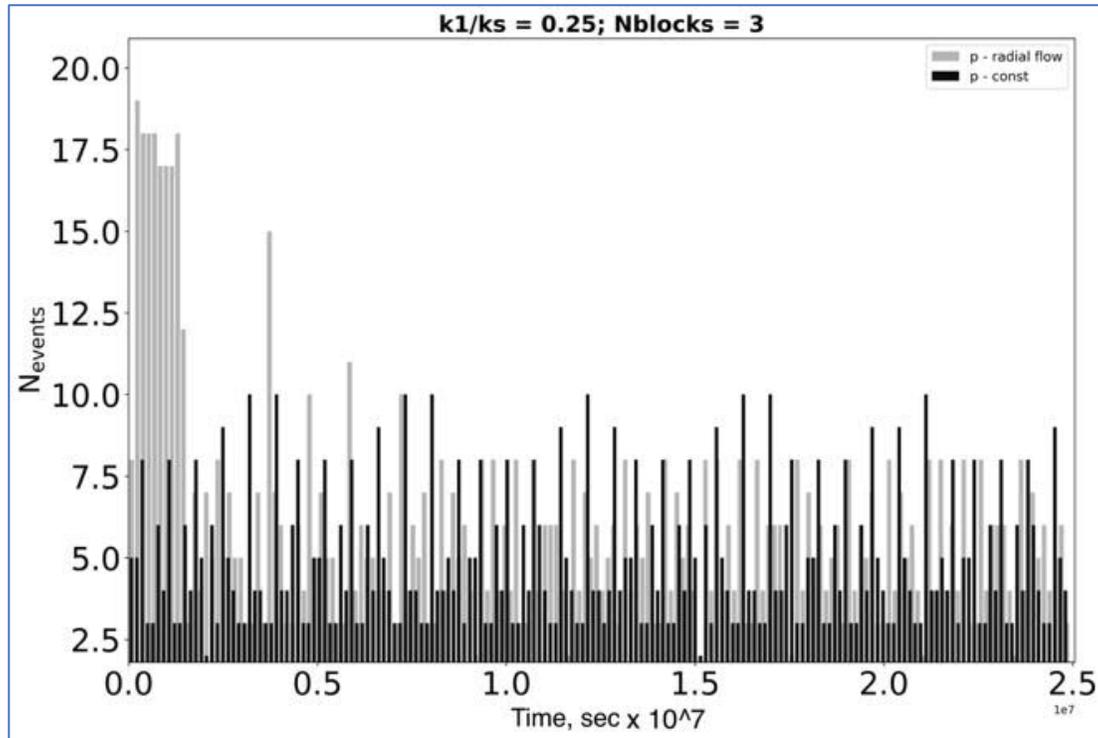
$$Ei(t) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$$



# Применение модели для случая Базеля



# Возможные сценарии развития сейсмичности при закачке



Турунтаев С.Б., Рига В.Ю. // Триггерные эффекты в геосистемах (ред. Адушкин, Кочарян), 2017, 29-39.

# Использование машинного обучения для прогноза распространения сейсмичности при закачке жидкости

3D модель  
неоднородного  
коллектора

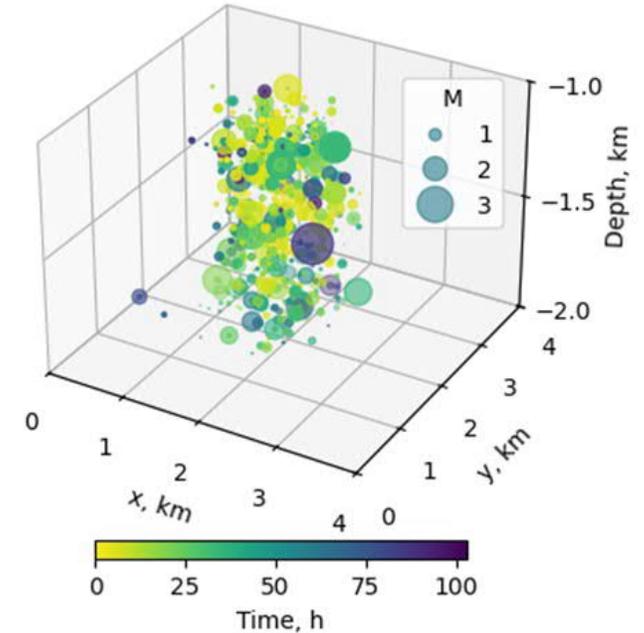
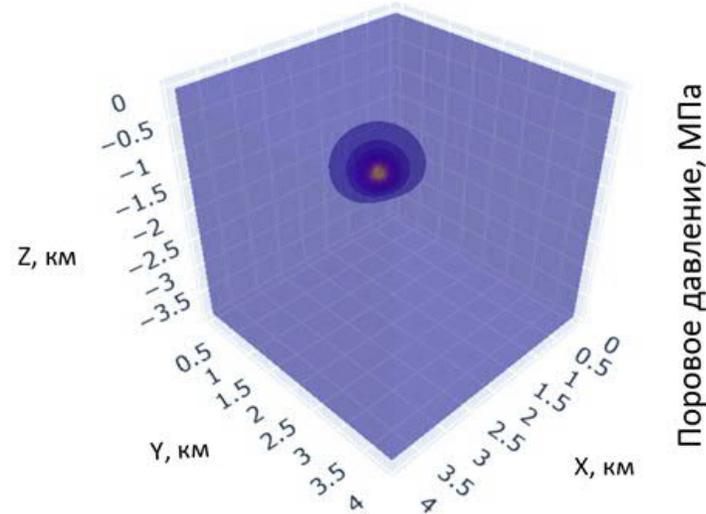
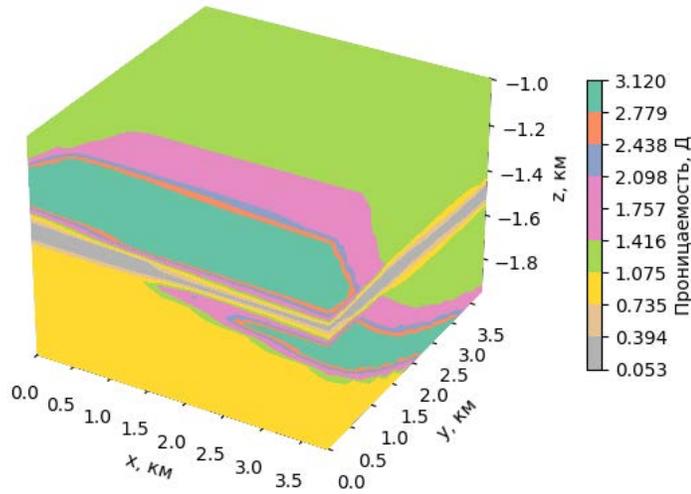


## Прямая задача

Моделирование динамики  
порового давления



Моделирование  
распространения событий



## Обратная задача

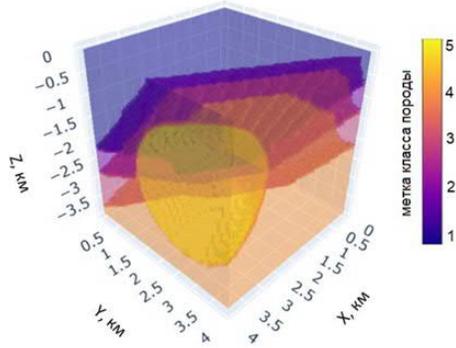


- Создание базы данных для обучения
- Обучение модели



# Методика прямого моделирования распространения порового давления и микросейсмических событий при закачке жидкости

## Модель среды:



## Поровое давление:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \Delta P + q \quad q = \beta_f \cdot \frac{Q}{V}$$

$$\chi = \frac{k}{m \cdot \eta} \left( \frac{1}{\beta_f} + \frac{1}{\beta_m} \right)^{-1}$$

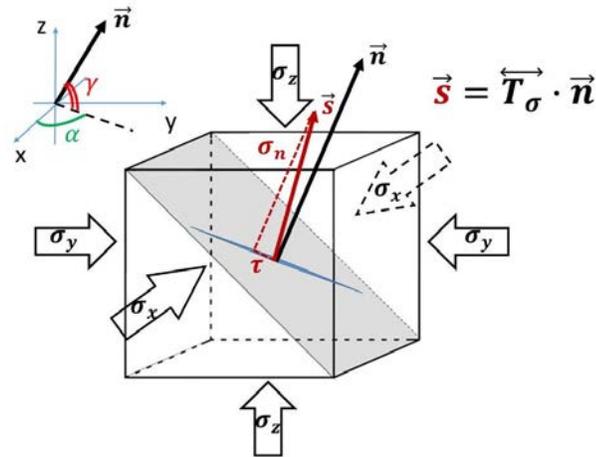
$$\beta_f = \rho_f \frac{dP}{d\rho_f}, \quad \beta_m = m \frac{dP}{dm}$$

Гидростатика:  $P_f = \rho_f g z$

## Тензор напряжений (литостатика):

$$\overline{T'_\sigma(H)} = \begin{pmatrix} \frac{\nu}{1-\nu} \int_0^H \rho(z) g dz & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \int_0^H \rho(z) g dz & 0 \\ 0 & 0 & \int_0^H \rho(z) g dz \end{pmatrix}$$

## Нормальные и касательные напряжения для групп трещин:

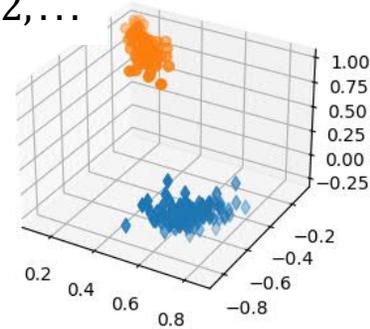


$$\vec{n}_i \sim N(\vec{n}_{0i}, \sigma_i^2), \quad i = 1, 2, \dots$$

$$\vec{s} = \overleftrightarrow{T'_\sigma} \cdot \vec{n}$$

$$\sigma_n = (\overleftrightarrow{T'_\sigma} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}$$

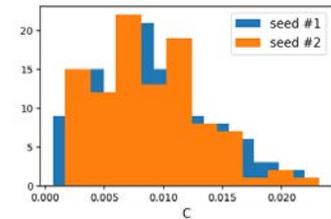
$$\tau = \sqrt{\vec{s} \cdot \vec{s} - \sigma_n^2}$$



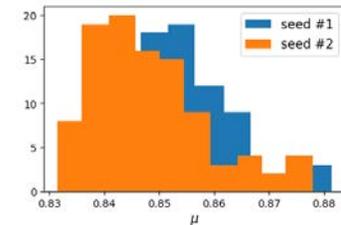
## Критерий Кулона-Мора:

$$\tau_n = \mu \cdot (\sigma_n - P) + C$$

$$C_i \sim W(C_0, \lambda_C, k)$$



$$\mu_i \sim W(\mu_0, \lambda_\mu, k)$$

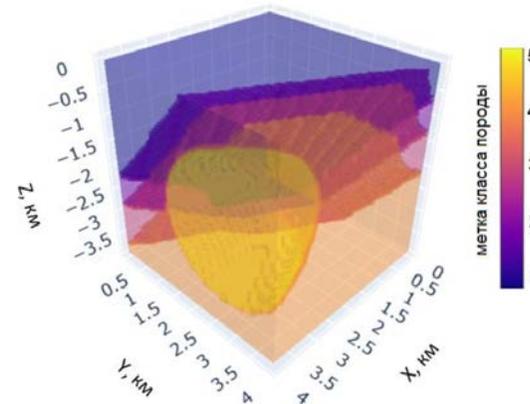
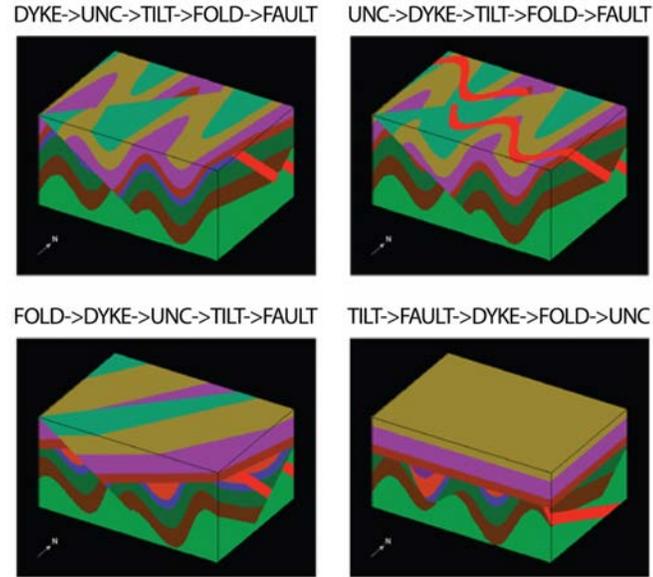


- Каждый элементарный объём содержит  $N \gg 1$  инициаторов событий (трещин), параметры которых распределены в согласно законам распределения.
- Количество событий на каждом шаге по времени определяется приращением количества инициаторов, для которых выполнен критерий Кулона – Мора.

# Создание базы данных модельных неоднородных сред

## База данных синтетических геологических моделей:

- Была использована база данных синтетических геологических моделей со случайной структурой и набором типов пород (36 типов пород, включающих в себя осадочные, метаморфические и вулканические породы) (Jessell, M. Et al., 2022)
- Модели получены авторами оригинальной работы в ходе численного моделирования случайного геологического процесса (поэтапное деформирование начальной слоистой структуры, сдвиги, неоднородные включения, выветривание и формирование осадочных пород)



Lithology	Lithology class	Genetic class	Mean density (g cm <sup>-3</sup> )	Std density	Mean permeability (Log10(mD))	Std permeability
Felsic_Dyke_Sill	Dyke	Intrusive	2.61	0.091	1.56	0.58
Mafic_Dyke_Sill	Dyke	Intrusive	2.79	0.016	1.56	0.58
Granite	Plug	Intrusive	2.69	0.095	1.56	0.58
Peridotite	Plug	Intrusive	2.85	0.155	1.56	0.58
Porphyry	Plug	Intrusive	2.84	0.129	1.56	0.58
Pyxinite_Hbndite	Plug	Intrusive	3.19	0.253	1.56	0.58
Gabbro	Plug	Intrusive	3.00	0.160	1.56	0.58
Diorite	Plug	Intrusive	2.85	0.135	1.56	0.58
Syenite	Plug	Intrusive	2.69	0.115	1.56	0.58
Amphibolite	Met_strat	Metamorphic	2.88	0.142	2.00	0.57
Gneiss	Met_strat	Metamorphic	2.70	0.074	2.00	0.57
Marble	Met_strat	Metamorphic	2.87	0.533	2.00	0.57
Meta_Carbonate	Met_strat	Metamorphic	2.74	0.037	2.00	0.57
Meta_Felsic	Met_strat	Metamorphic	2.78	0.302	2.00	0.57
Meta_Intermediate	Met_strat	Metamorphic	2.90	0.265	2.00	0.57
Meta_Mafic	Met_strat	Metamorphic	2.82	0.096	2.00	0.57
Meta_Sediment	Met_strat	Metamorphic	2.98	0.494	2.00	0.57
Meta_Ultramafic	Met_strat	Metamorphic	2.84	0.138	2.00	0.57
Schist	Met_strat	Metamorphic	2.82	0.110	2.00	0.57
Andesite	Met_strat	Volcanic	2.72	0.092	2.77	0.46
Basalt	Met_strat	Volcanic	2.79	0.155	2.77	0.46
Dacite	Met_strat	Volcanic	2.62	0.129	2.77	0.46
Ign_V_Breccia	Met_strat	Volcanic	2.91	0.102	2.77	0.46
Rhyolite	Met_strat	Volcanic	2.63	0.071	2.77	0.46
Tuff_Lapillistone	Met_strat	Volcanic	2.65	0.110	2.77	0.46
V_Breccia	Met_strat	Volcanic	2.77	0.168	2.77	0.46
V_Conglomerate	Met_strat	Volcanic	2.76	0.104	2.77	0.46
V_Sandstone	Met_strat	Volcanic	2.78	0.101	2.77	0.46
V_Siltstone	Met_strat	Volcanic	2.86	0.103	2.77	0.46
Conglomerate	Strat	Sedimentary	2.62	0.116	3.08	0.23

Jessell, M., Guo, J., Li, Y., Lindsay, M., Scalzo, R., Giraud, J., Pirot, G., Cripps, E., and Ogarko, V.: Into the Noddyverse: a massive data store of 3D geological models for machine learning and inversion applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 381–392, <https://doi.org/10.5194/essd-14-381-2022>, 2022.

# Создание базы данных синтетических каталогов событий

**Параметры инициаторов событий  $N = 1000$  в каждой ячейке:**

$$C_i \sim W(C_0, \lambda_C, k)$$

$$\mu_i \sim W(\mu_0, \lambda_\mu, k)$$

$$\alpha_i \sim N(\alpha_0, \sigma_\alpha^2)$$

$$\gamma_i \sim N(\gamma_0, \sigma_\gamma^2)$$

$$C_0 = 0.1 \text{ МПа}$$

$$\lambda_C = 0.03 \text{ МПа}$$

$$\mu_0 = 0.83$$

$$\lambda_\mu = 0.02 \text{ МПа}$$

$$k = 1.8$$

$$\alpha_0 = \pi/4$$

$$\gamma_0 = \pi/2$$

**Постоянные параметры среды:**

$$m = 0.2$$

$$\rho_f = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\eta = 2 \text{ сП}$$

$$\beta_f = \beta_m = 10^4 \text{ МПа}$$

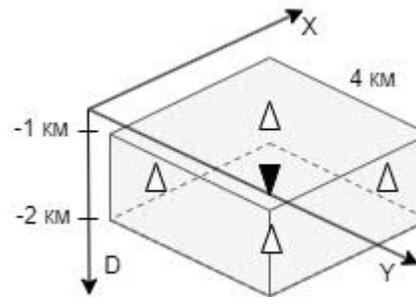
$$\nu = 0.3$$

**Варьируемые параметры среды – проницаемость для разных типов пород:**

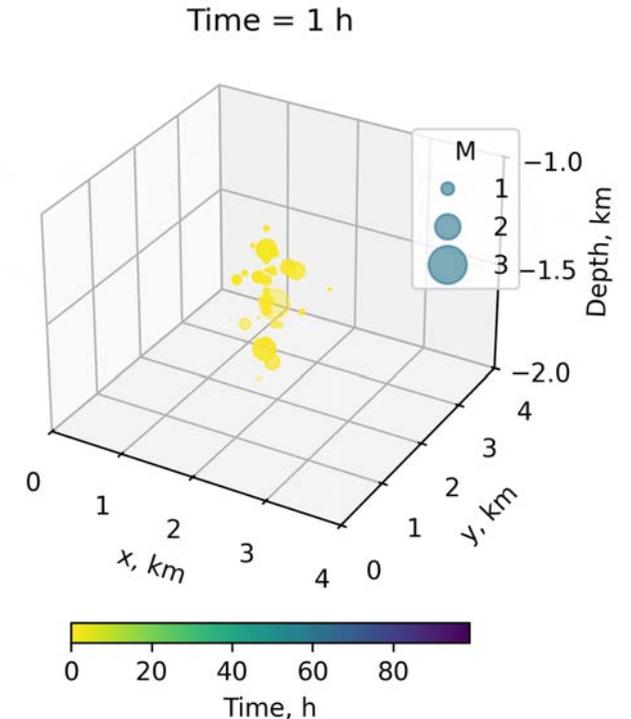
$$k \sim \text{LogN}(k_0, \sigma_k^2)$$

Тип горной породы	$k_0,$ ( $\log_{10}(\text{мД})$ )	$\sigma_k,$ ( $\log_{10}(\text{мД})$ )
Интрузивный	1.56	0.58
Метаморфический	2.00	0.57
Вулканический	2.77	0.46
Осадочный	3.08	0.23

**Схема закачки –** нагнетательная скважина в центре и 4 добывающие по периметру, режим поддержания давления:



Магнитуда события выбиралась случайным образом исходя из линейного закона повторяемости ( $M_{\min} = 0, b = 1$ ):



**Результат - база данных синтетических каталогов событий для 130 тысяч моделей коллекторов**

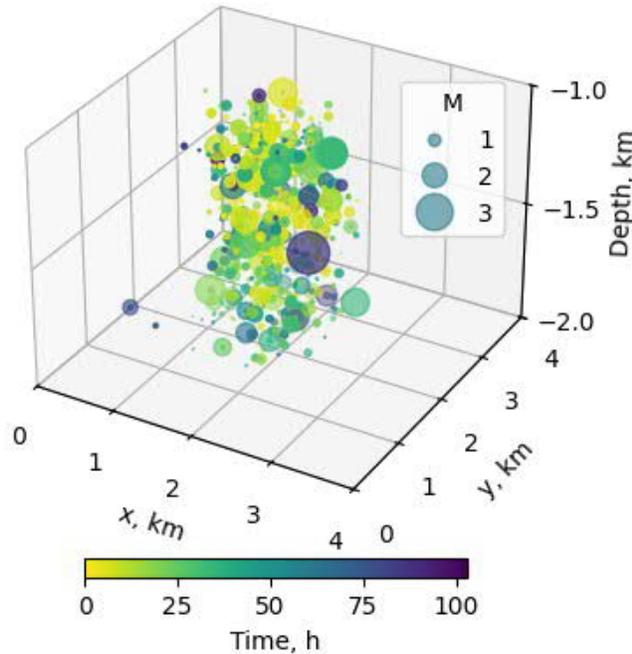
Scibek J. Multidisciplinary database of permeability of fault zones and surrounding protolith rocks at world-wide sites // Sci Data. 2020. Т. 7. № 1. С. 95.

# Модель глубокого обучения для восстановления фильтрационных свойств среды

## Входные данные –

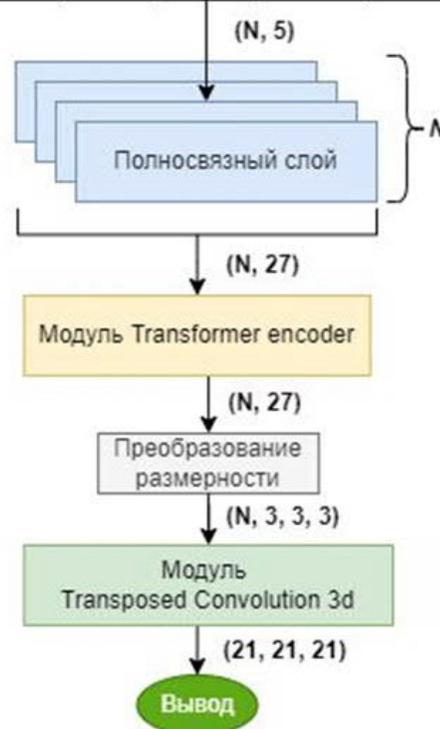
каталог событий:

- Время
- Координаты (X,Y,Z)
- Магнитуда события



## Схема модели:

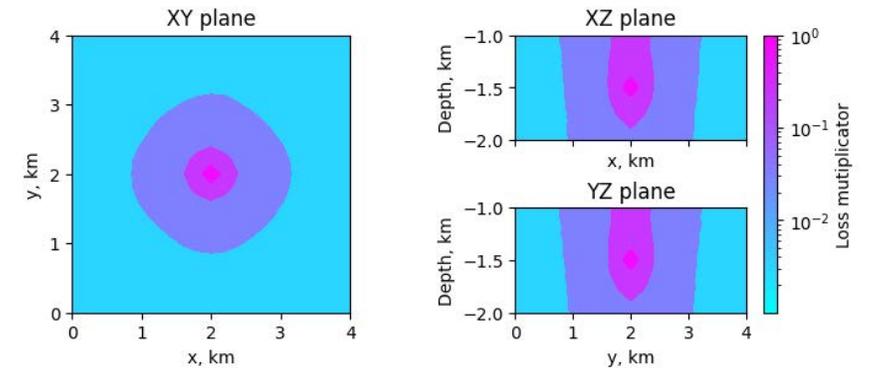
$T$ , час	$X$ , км	$Y$ , км	$D$ , км	$M$
1	2	2,1	-1,5	0.1
2	2,1	1,9	-1,2	0.3
...	...	...	...	...
$N$	3.8	2.9	-1.9	0.0



## Функция потерь:

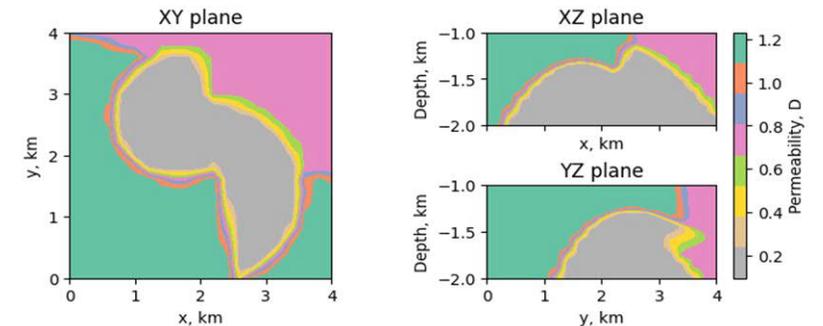
$$l = \frac{1}{21^3} \sum_{x,y,d} f_{x,y,d} \cdot (\log(k_{x,y,d}) - \log(\hat{k}_{x,y,d}))^2$$

$f_{x,y,d}$  – матрица коэффициентов штрафа:



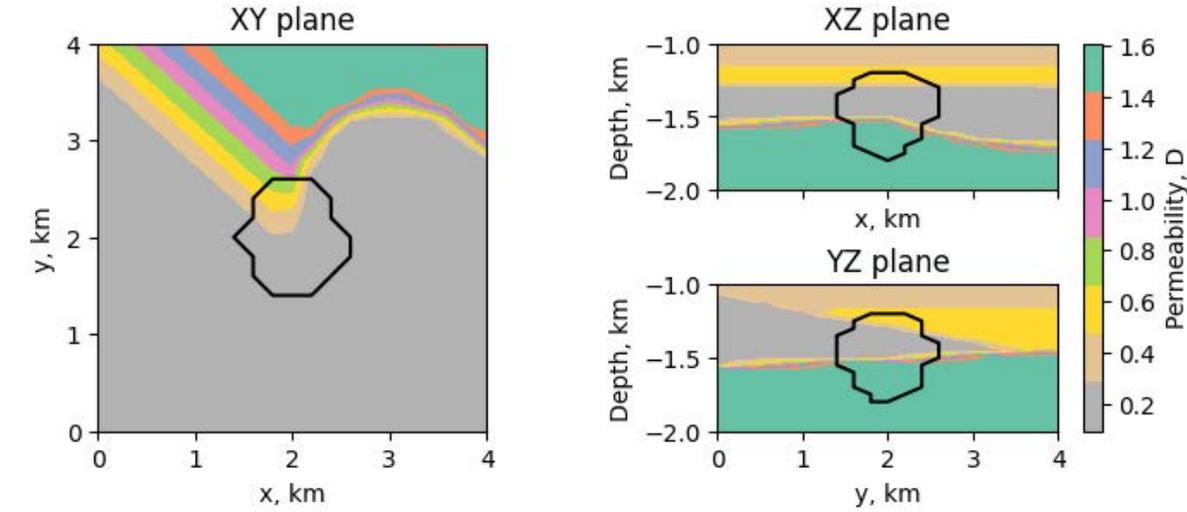
## Выходные данные:

3D модель проницаемости среды

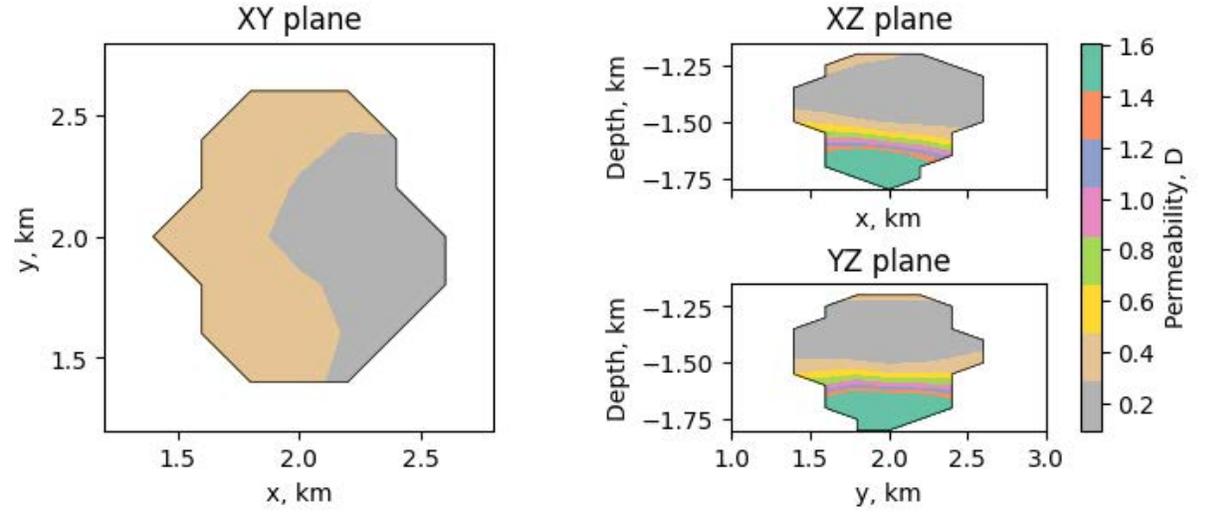
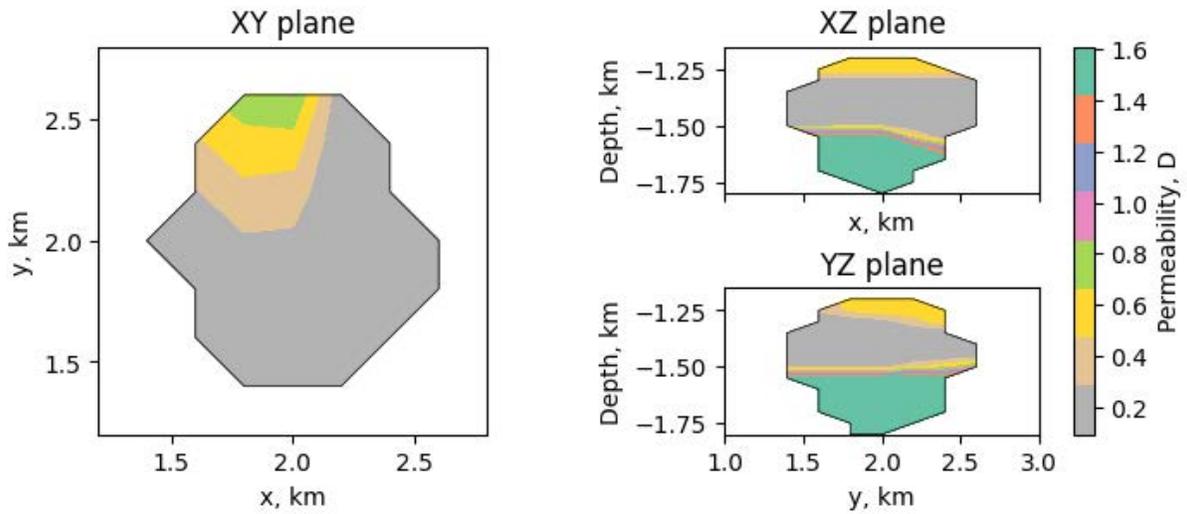
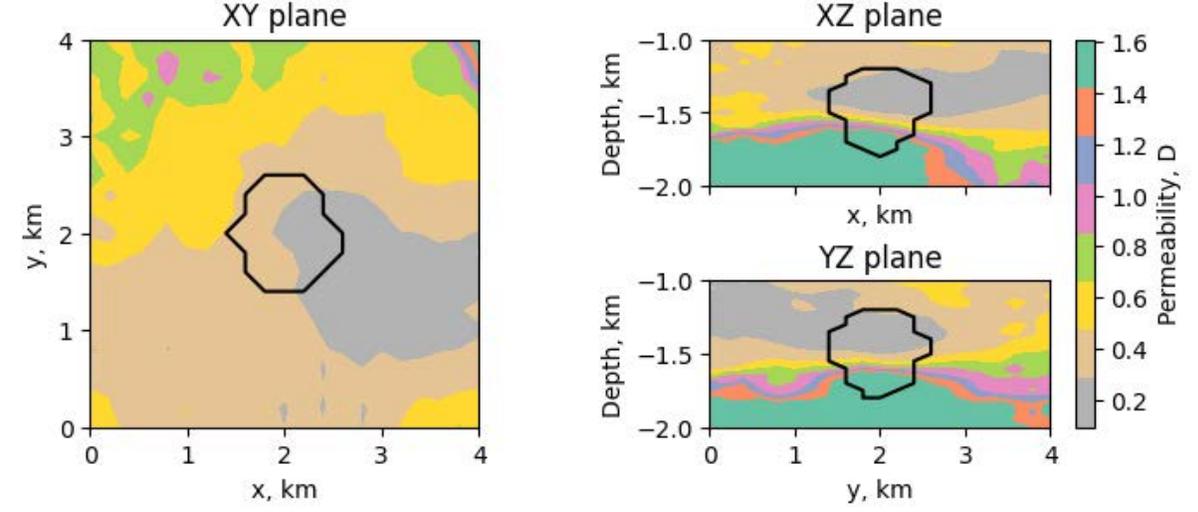


# Пример результата восстановления проницаемости неоднородной модели коллектора

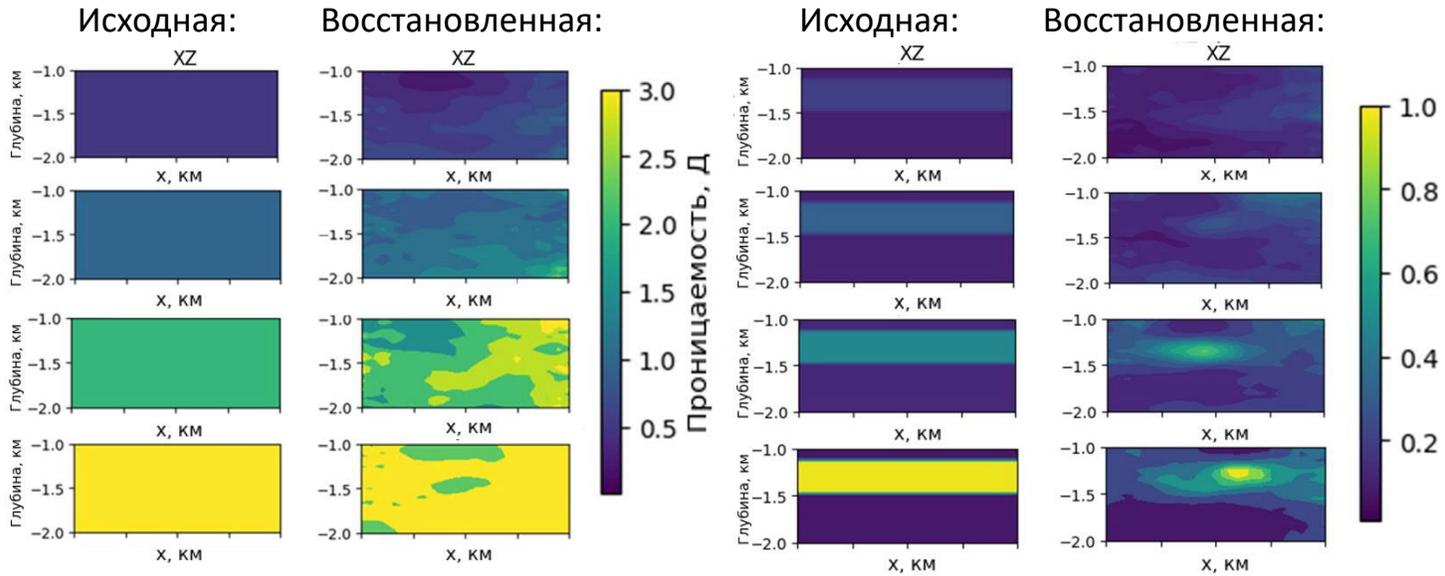
## Исходная модель проницаемости коллектора



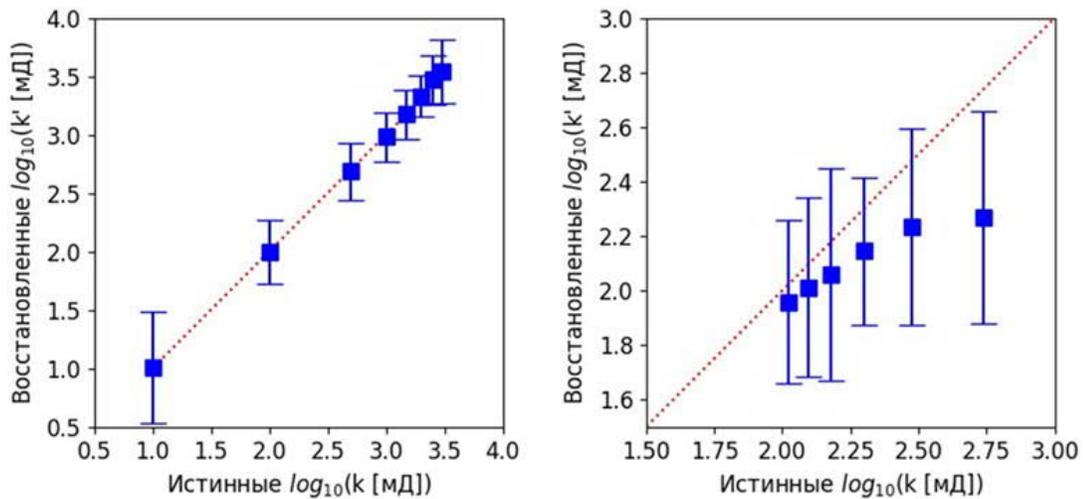
## Восстановленная модель проницаемости коллектора



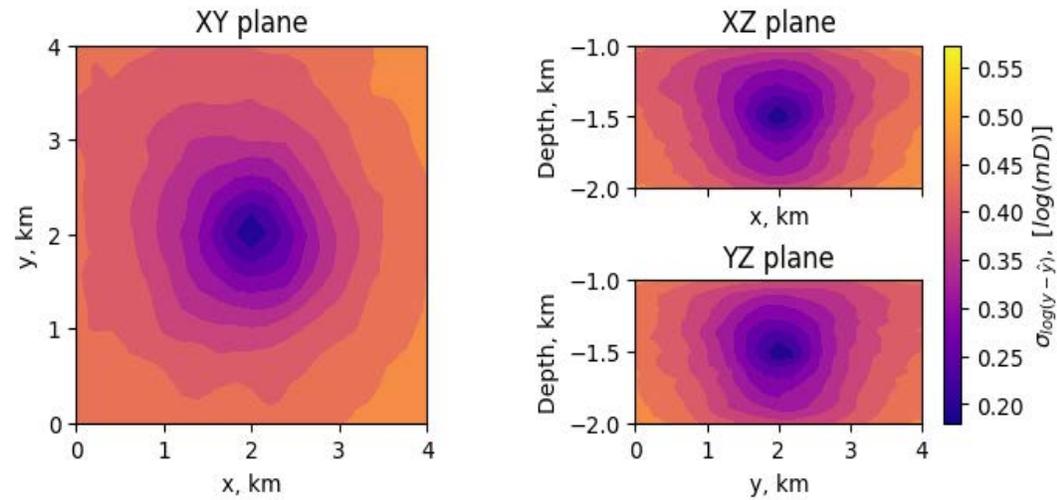
Восстановление проницаемости однородной модели коллектора и модели с дополнительным слоем с различной проницаемостью:



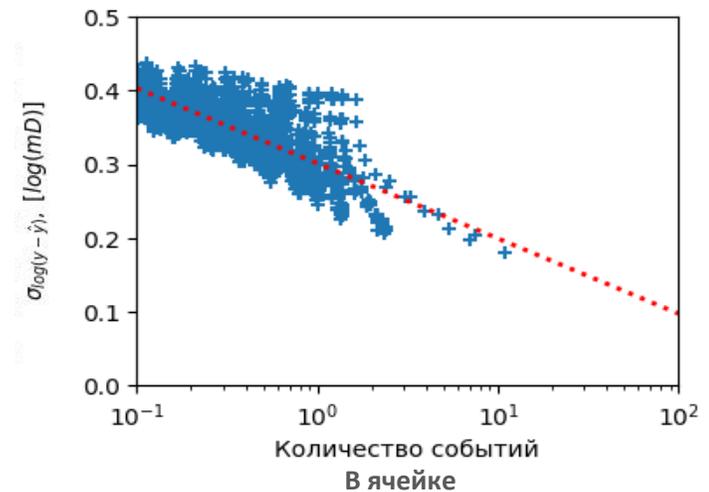
Ошибка восстановления в зависимости от величины проницаемости однородной модели коллектора и модели с дополнительным слоем :



Пространственное распределение стандартного отклонения  $\log_{10}(k)$  (усредненное по всей тестовой выборке):

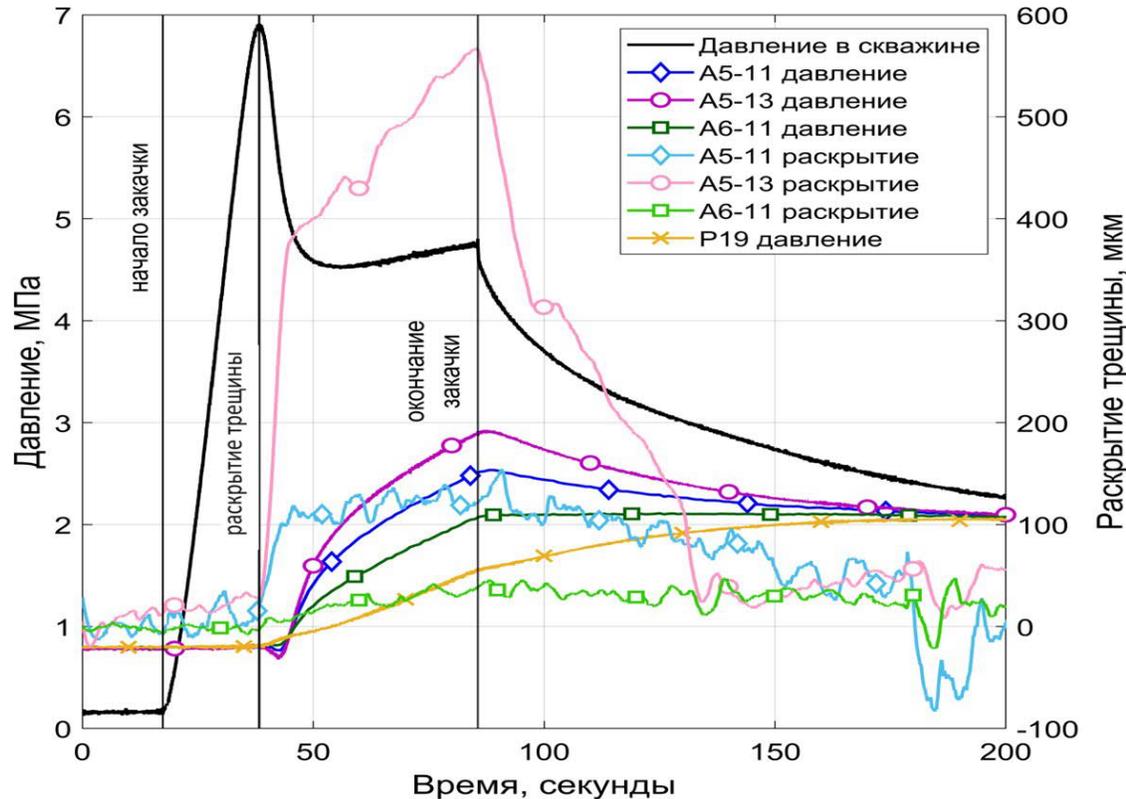


Зависимость стандартного отклонения  $\log_{10}(k)$  от среднего количества событий в ячейке среды:

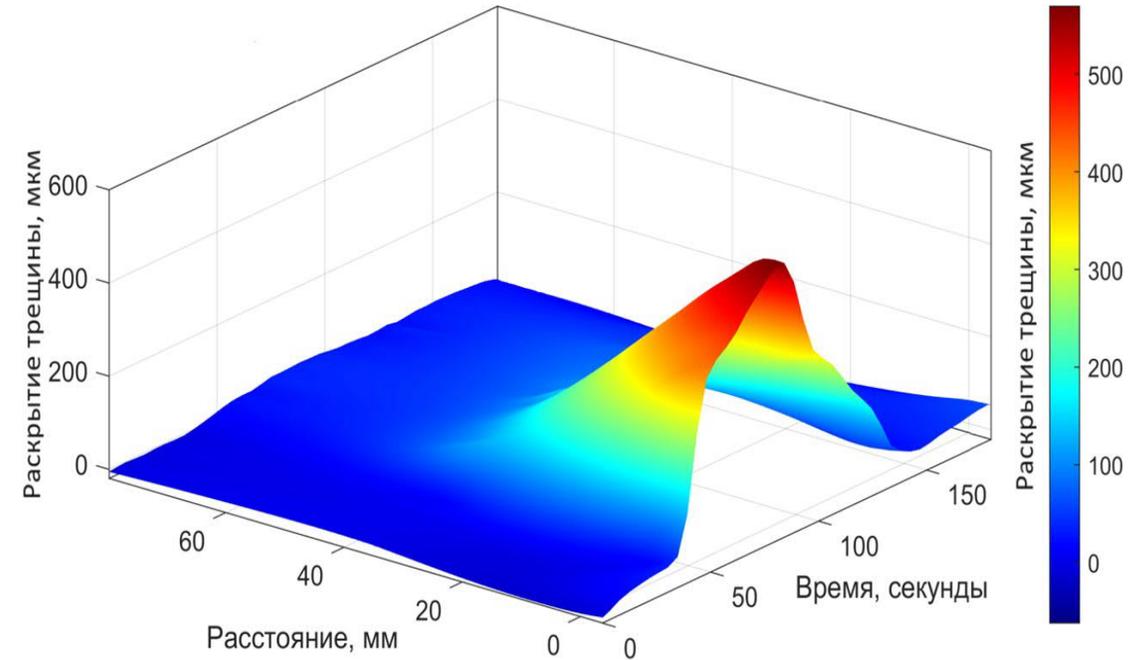


# Взаимодействие трещины гидроразрыва с естественной трещиной

Зависимость давления в скважине, давлений жидкости и величин раскрытия трещины ГРП на различных ее участках от времени



Изменение раскрытия заранее созданной трещины в зависимости от времени и расстояния от места пересечения с трещиной ГРП



- Показано, что обе трещины образуют единую гидравлическую систему, практически одновременно реагирующую на закачку жидкости в нагнетательную скважину.
- Величина раскрытия заранее созданной трещины уменьшается с расстоянием от места её пересечения с трещиной гидроразрыва.

# Заключение

- Воздействие на флюидные системы недр приводит к сейсмическим событиям
- Реализация сейсмического или асейсмического типа движения определяется параметрами закачки и условиями на разломе. Переход к сейсмогенерирующему режиму 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.
- Предложена методика восстановления пространственного распределения фильтрационных свойств неоднородного коллектора по данным о распространении облака микросейсмических событий, вызванного закачкой жидкости.
- Разработанная методика применена к задаче об эволюции микросейсмичности, вызванной закачкой жидкости с постоянным расходом в модельный неоднородный коллектор. Полученная модель позволяет восстанавливать крупномасштабные неоднородности среды внутри области с радиусом порядка 250 метров вокруг нагнетательной скважины
- Интерпретация данных мониторинга должна опираться на геомеханические модели движений пористой флюидонасыщенной трещиноватой среды, содержащей разломы. Сценарии развития индуцированной сейсмичности сильно зависят от параметров модели. Для настройки модели необходимы предварительные исследования.



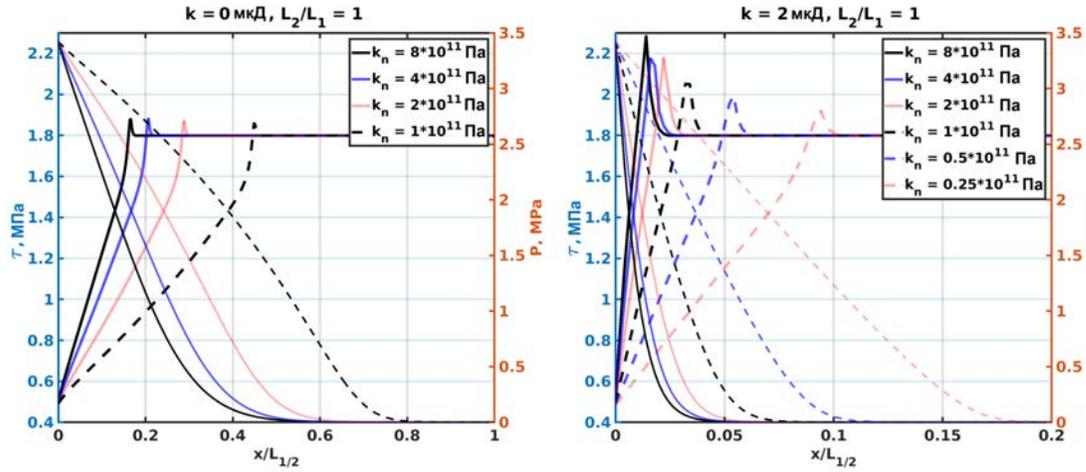
СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!

---

[idg.ras.ru](http://idg.ras.ru)



# Влияние параметров закачки и свойств разлома на процесс скольжения



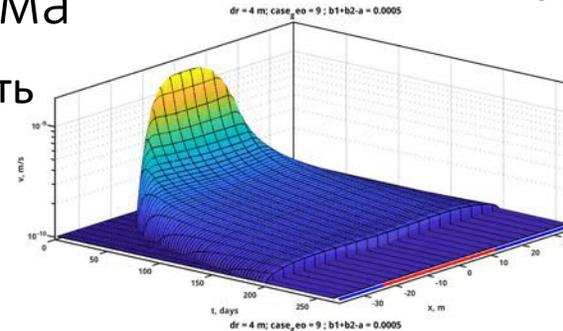
Профили вдоль полудлины для касательного напряжения и порового давления в конце расчета для различных значений нормальной жесткости и поровой проницаемости породы ( $\tau_0 = 1.8$  МПа):  
 а - непроницаемая порода, б - малопроницаемая порода.

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

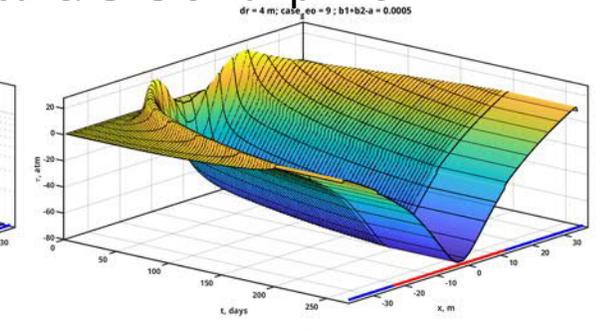
В. Ю. Рига, С. Б. Турунтаев. Моделирование индуцированной сейсмичности на основе двухпараметрического закона rate-and-state. // Физика Земли, 2021

## Касательные напряжения

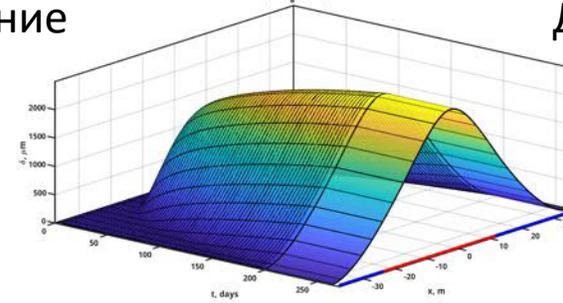
Скорость



Давление

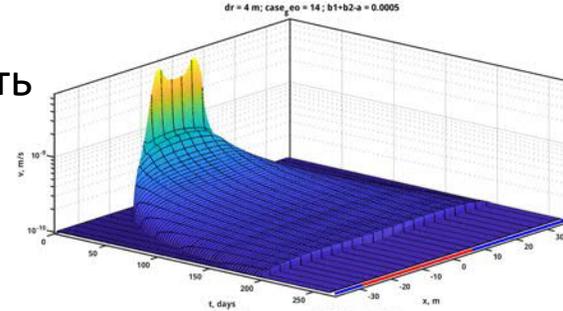


Смещение

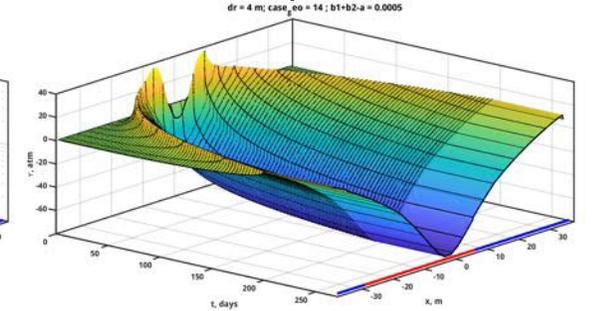


## Касательные напряжения

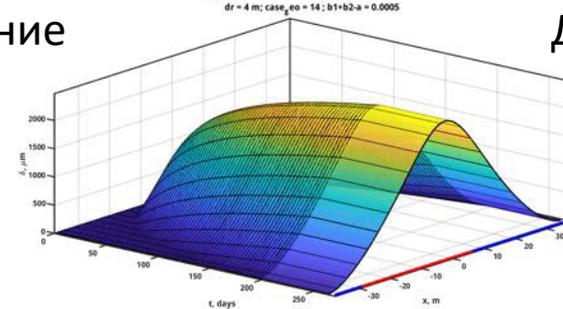
Скорость



Давление



Смещение



# Кинематика естественных разломов и трещин при изменении пластического давления

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

