

Возникновение  
сейсмогенерирующих подвижек  
при закачке жидкости вблизи  
тектонического разлома.

С.Б. Турунтаев, В.Ю. Рига,

Е.В. Зенченко

ИДГ РАН

ВНИИА

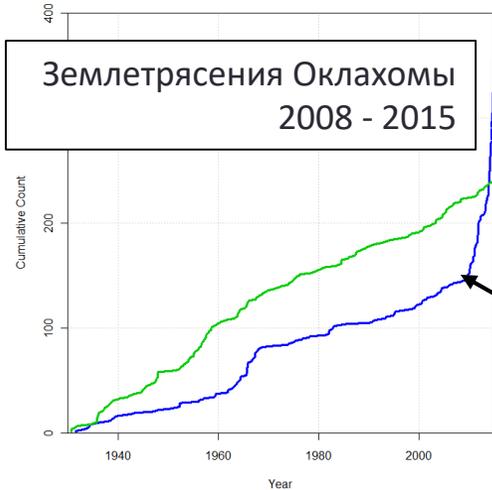
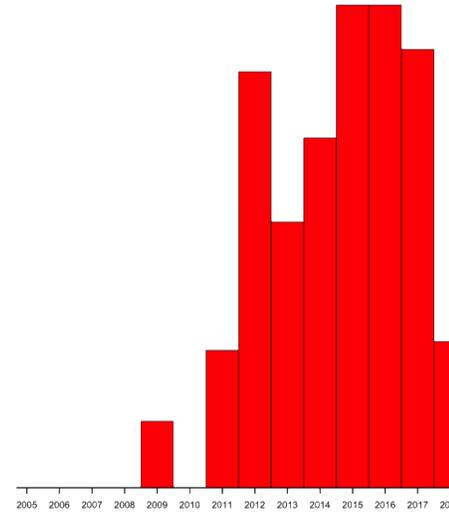
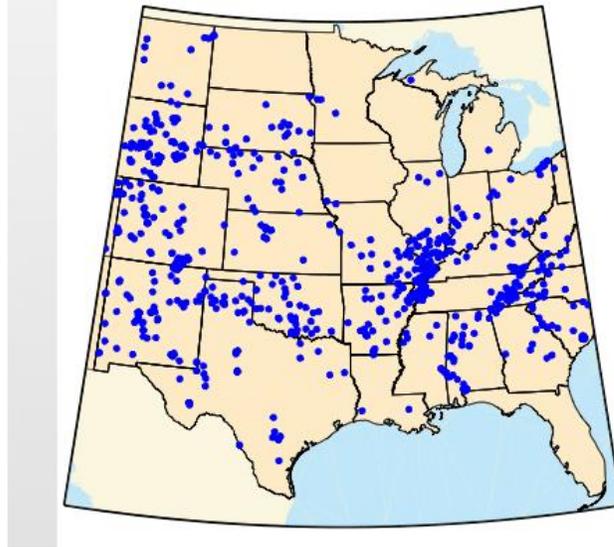
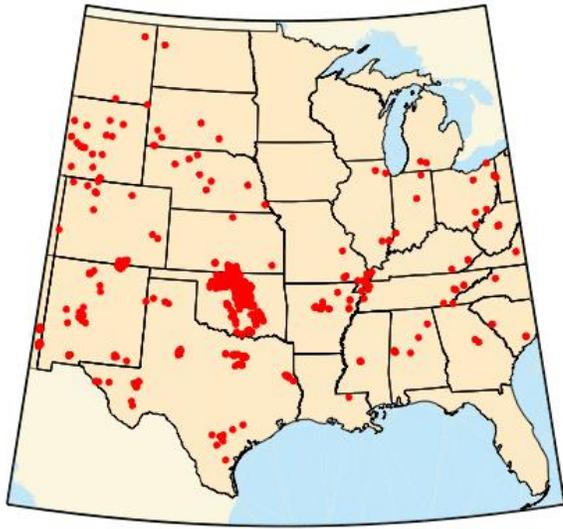
# Содержание

- Мотивация
- Примеры сейсмичности при закачке
- Активация разломов и трещин при изменении пластового давления. Закон трения rate-and-state
- Примеры расчетов
- Лабораторное моделирование
- Заключение

# Усиление сейсмической активности при разработке сланцевых месторождений нефти, США

2009-2015 361  $M \geq 3$  /год

1973-2008 24  $M \geq 3$  /год

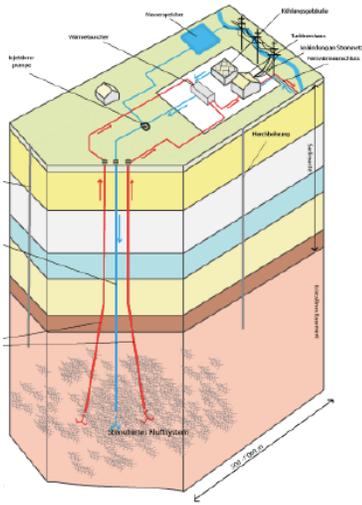


*William L. Ellsworth et al.*  
*Stanford Centre for Induced and Triggered Seismicity*

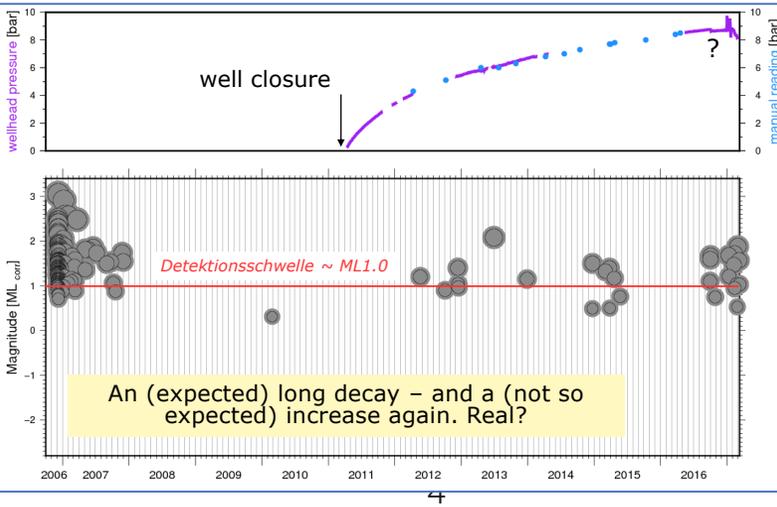
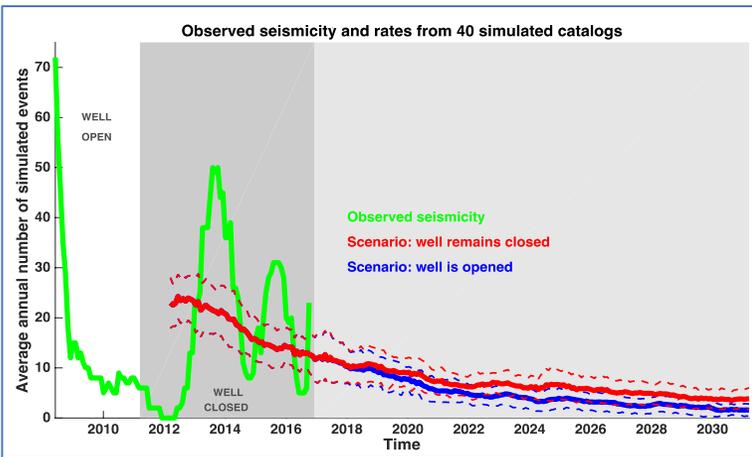
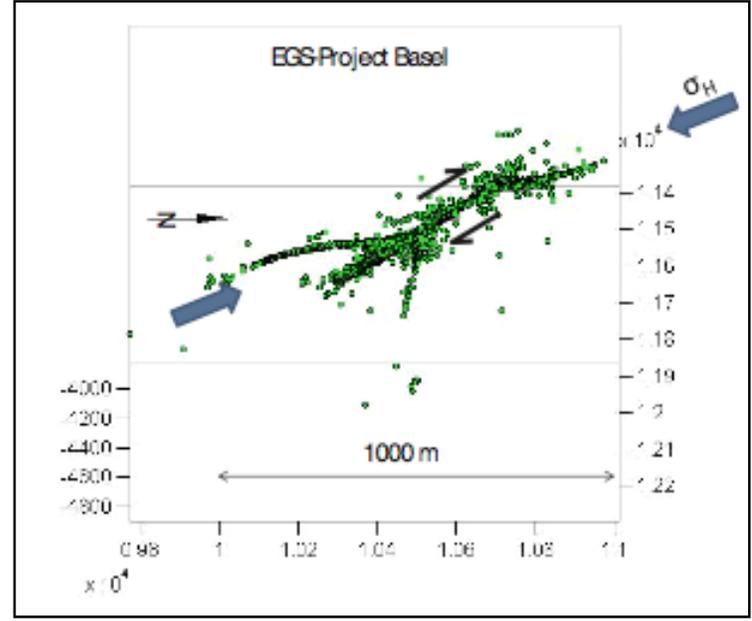
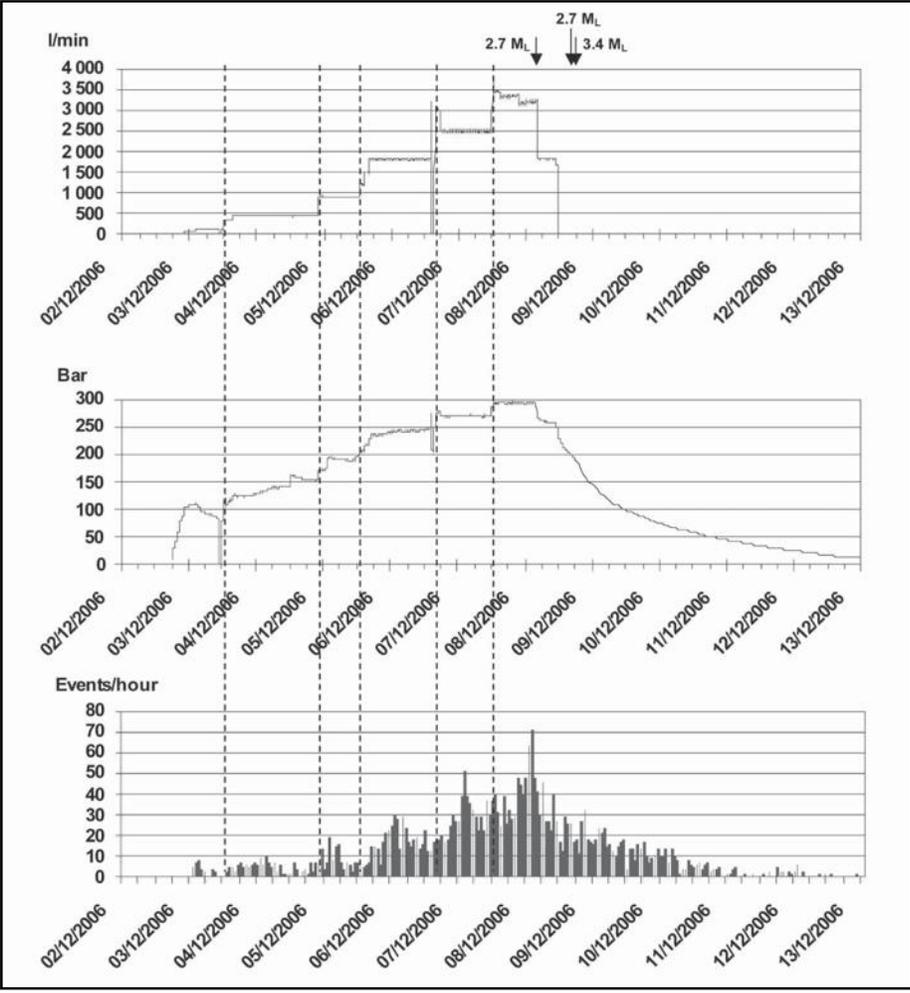
Рост сейсмичности в результате разработки сланцевых месторождений

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 активизация началась после увеличения темпов закачки.

# Базельский геотермальный проект



Basel (2006)  
(EGS)



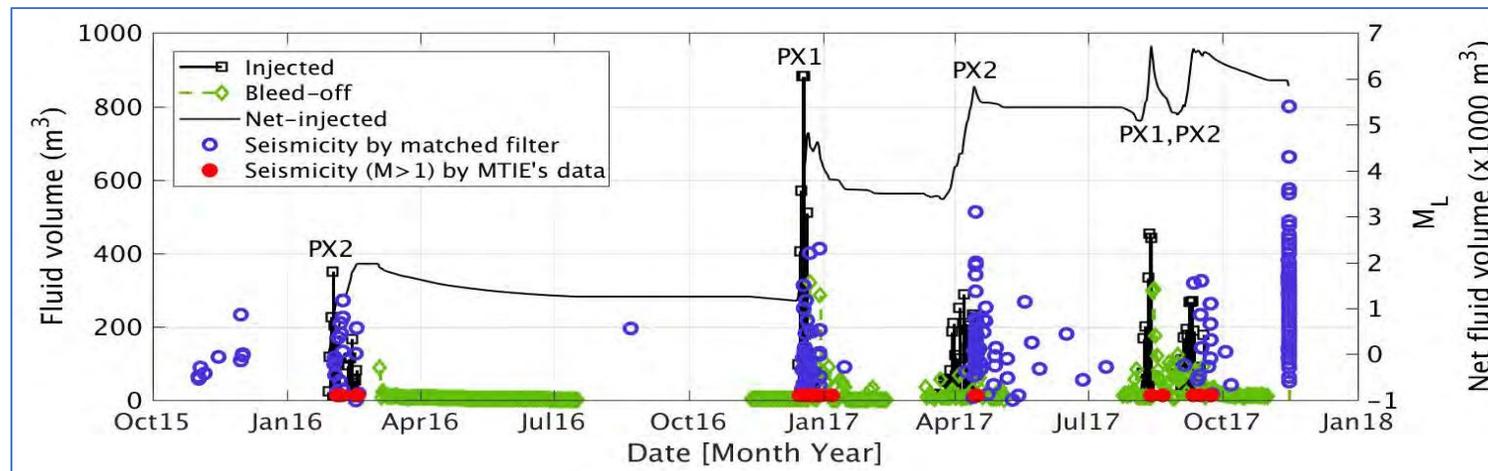
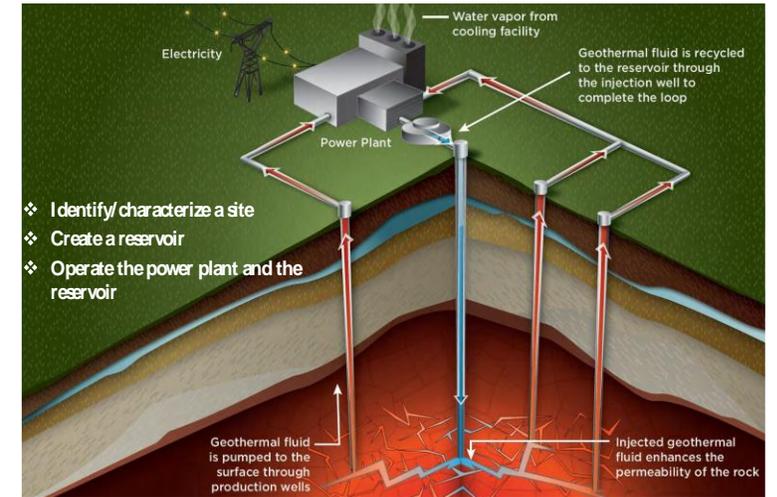
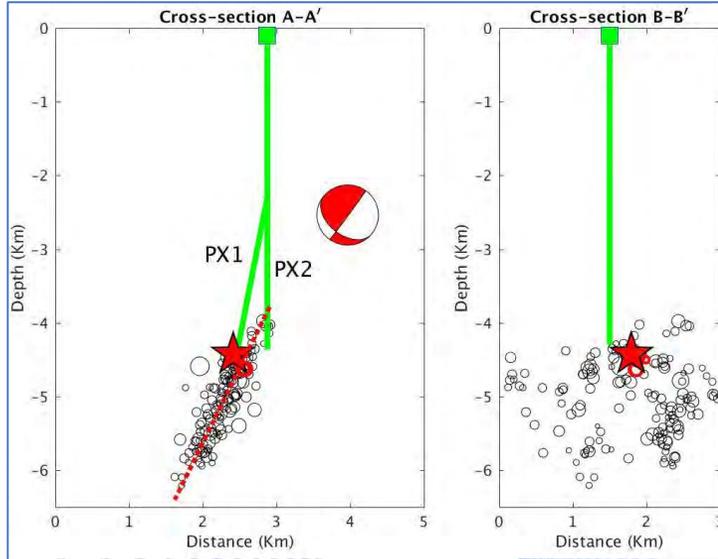
Stefan Wiemer, Induced seismicity workshop, Davos, 2017

# Землетрясение M=5.4 Pohang, Южная Корея, 15.11.2017

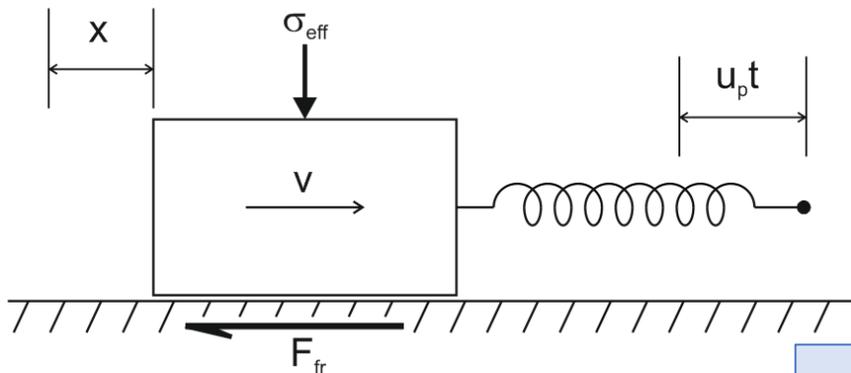
135 потерпевших  
297 млн. долларов ущерб  
4.5 км глубина гипоцентра



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



# Закон трения rate-and-state



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

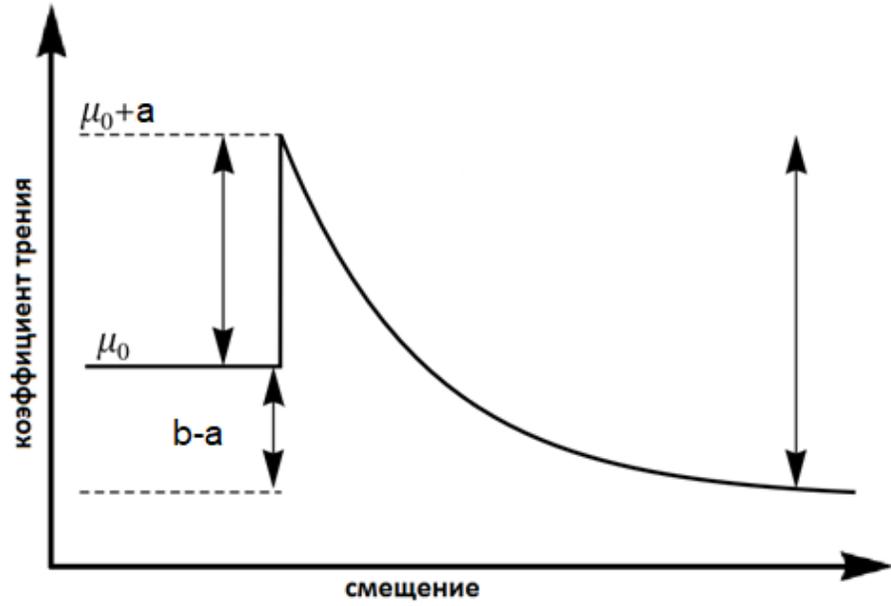
$$\mu = \mu_0 + a \ln\left(\frac{v}{v^*}\right) + b \ln\left(\frac{v^*\theta}{L}\right)$$

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

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

Параметр состояния шероховатостей

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



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

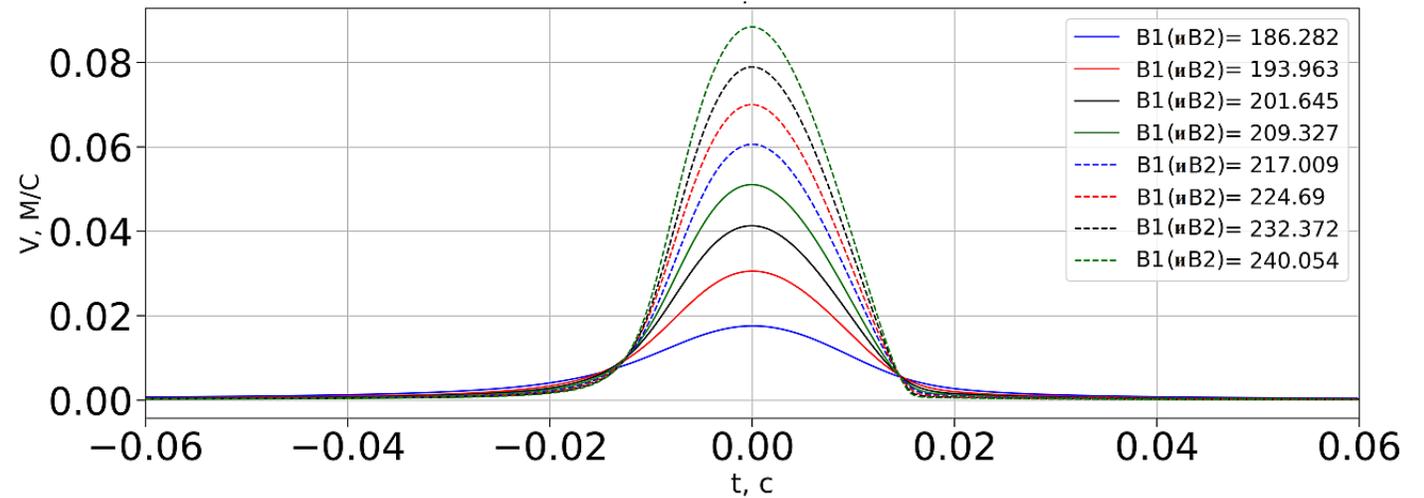
Условие возникновения неустойчивого скольжения

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

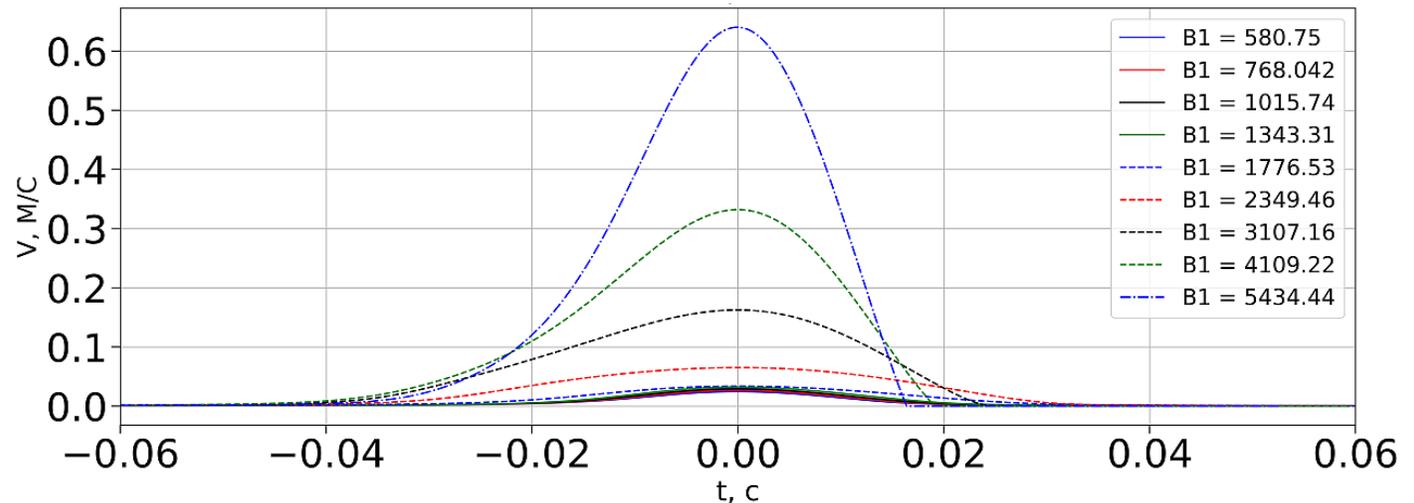
# Выбор вида закона трения



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



Характерный профиль скорости при скольжении блока



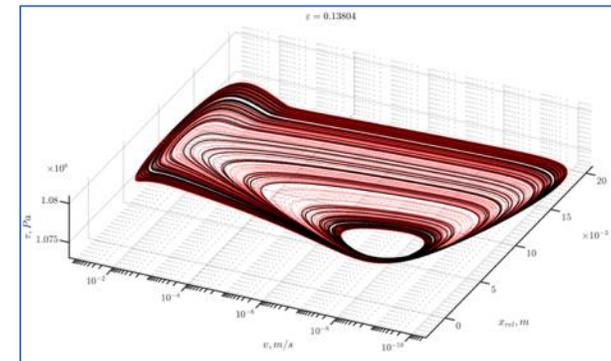
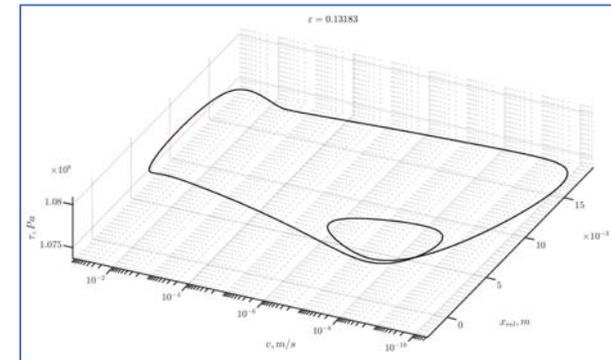
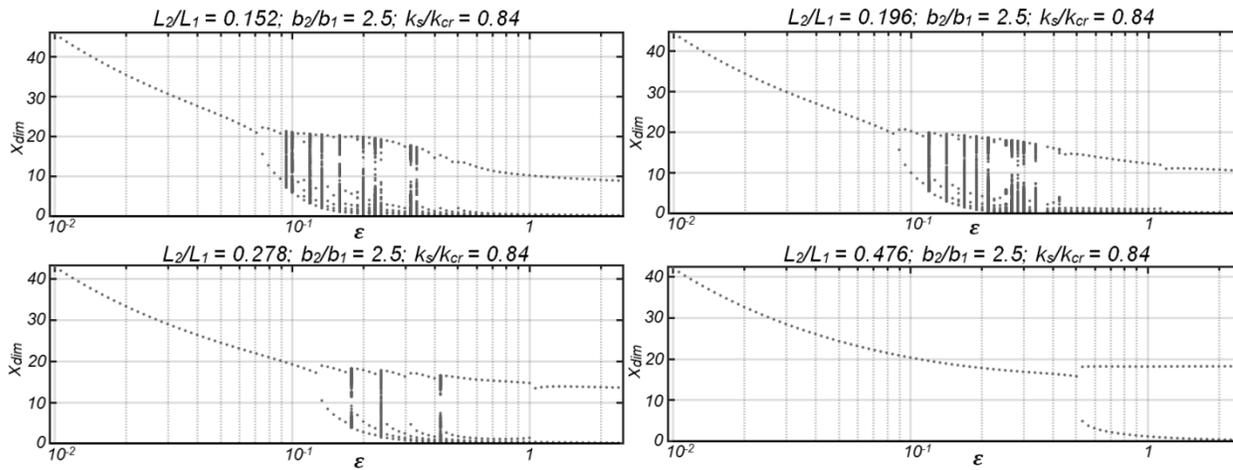
Наблюдаемая сейсмичность, как и скольжение в лабораторных условиях, носит хаотический характер. Однопараметрический закон трения не позволяет описывать хаотическое движение, в отличие от двухпараметрического

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

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

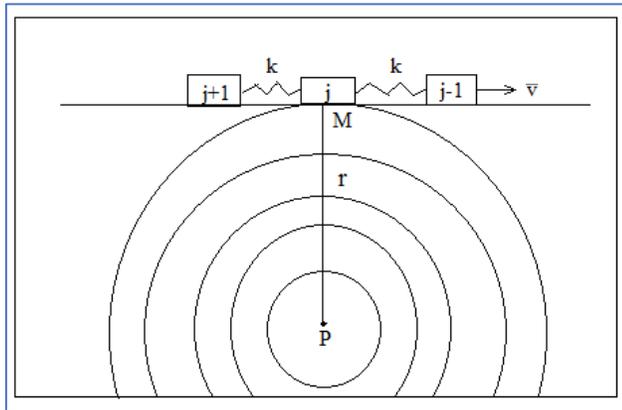
$$\hat{k}_{cr} = \left[ (\beta_1 - 1) + \rho^2(\beta_2 - 1) + 2\rho(\beta_1 + \beta_1 - 1) + \sqrt{\{[(\beta_1 - 1) + \rho^2(\beta_2 - 1)]^2 + 4\rho^2(\beta_1 + \beta_1 - 1)\}} \right] / (4\rho)$$

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



По вертикальной оси - карта безразмерных координат точек отображения Пуанкаре; по горизонтальной – значение величины  $\epsilon = \frac{b_1 + b_2 - a}{a}$ . Показаны случаи для различных соотношений величины  $L_2/L_1$

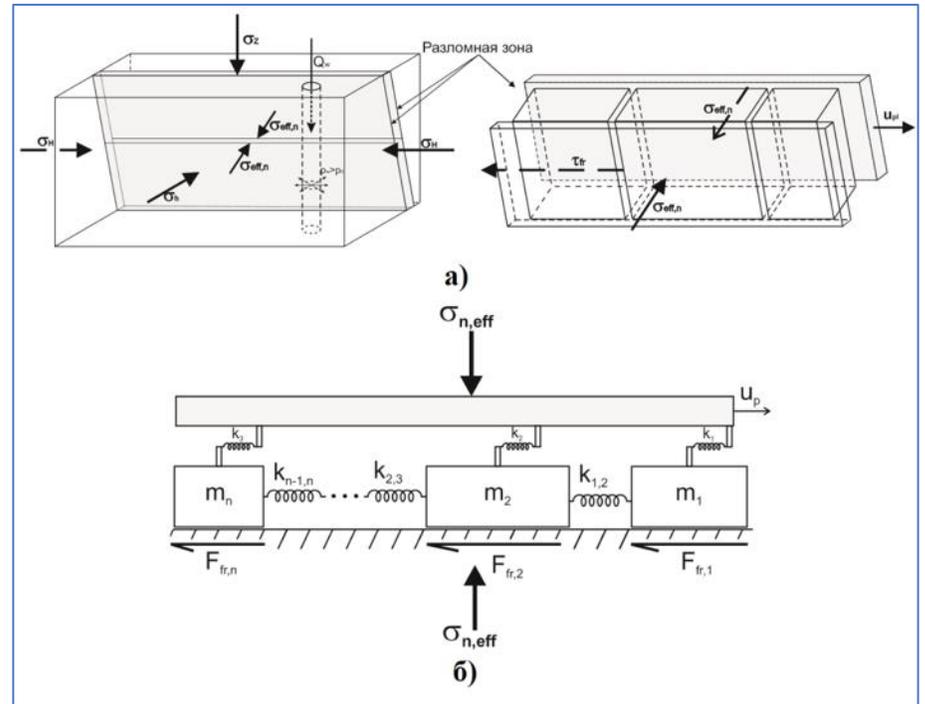
# Модель сейсмичности при изменении порового давления



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

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

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



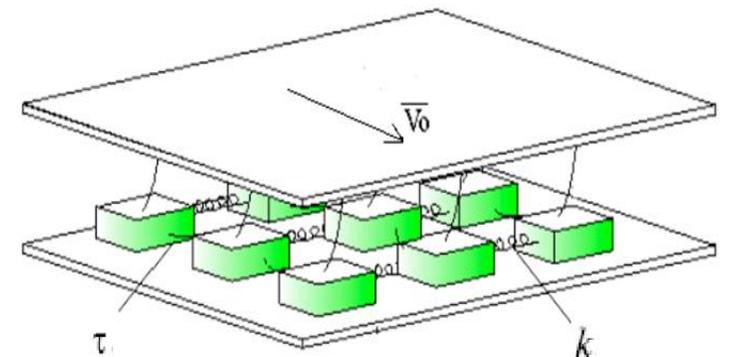
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(v_0 t - x_1) - k_{12}(x_1 - x_2) - F_{fr1} \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(v_0 t - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) - k_{23}(x_2 - x_3) - F_{fr2} \\ \dots \end{cases}$$

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

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

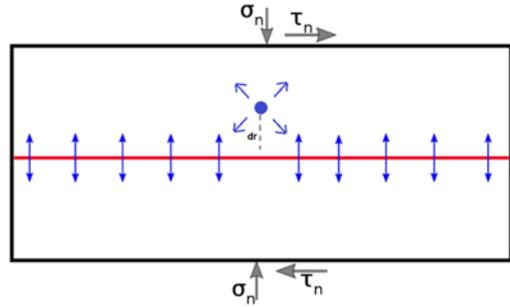
$$M_0 = G \int D dS$$

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

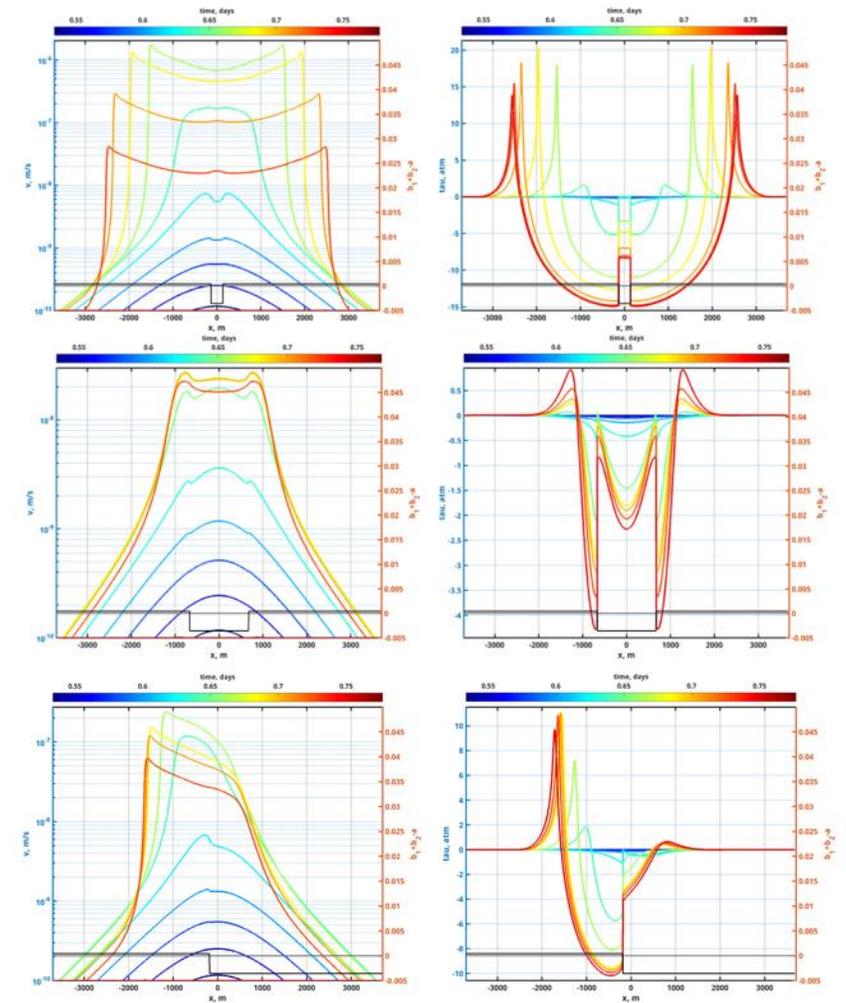
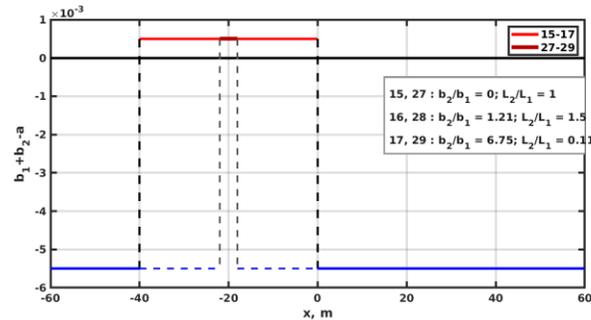
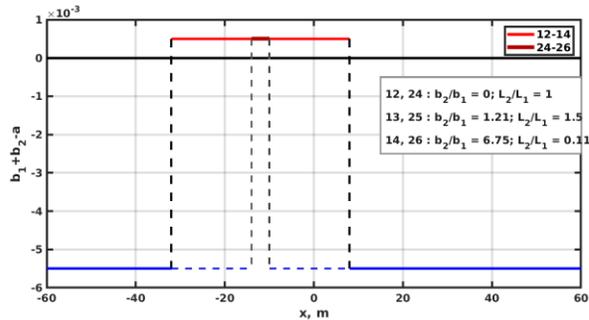
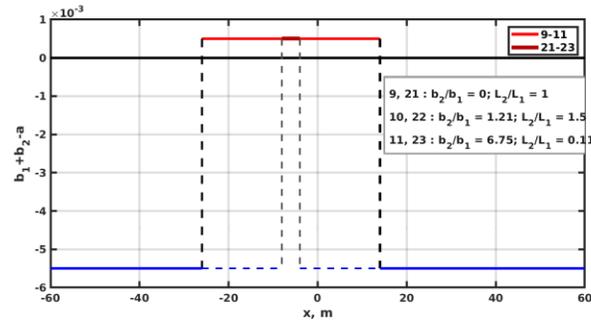
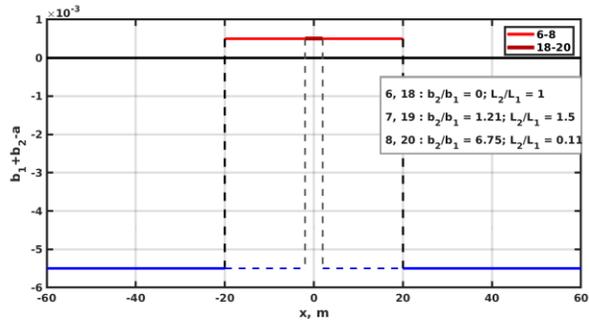


(Brace, Byerlee, 1966; Burridge & Knopov, 1967; Talwani and Acree, 1985, Shapiro et al., 2006, Dinske et al., 2012, McClure, 2012, Willis-Richards et al., 1996; Rahman et al., 2002; Ghassemi and Tarasovs, 2006; Kohl and Mège, 2007; Bruel, 2007; Baisch et al., 2010; Rachez and Gentier, 2010; Deng et al.,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

# Исследование влияния расположения закачивающей скважины и области разупрочнения на разломе на процесс деформации разлома

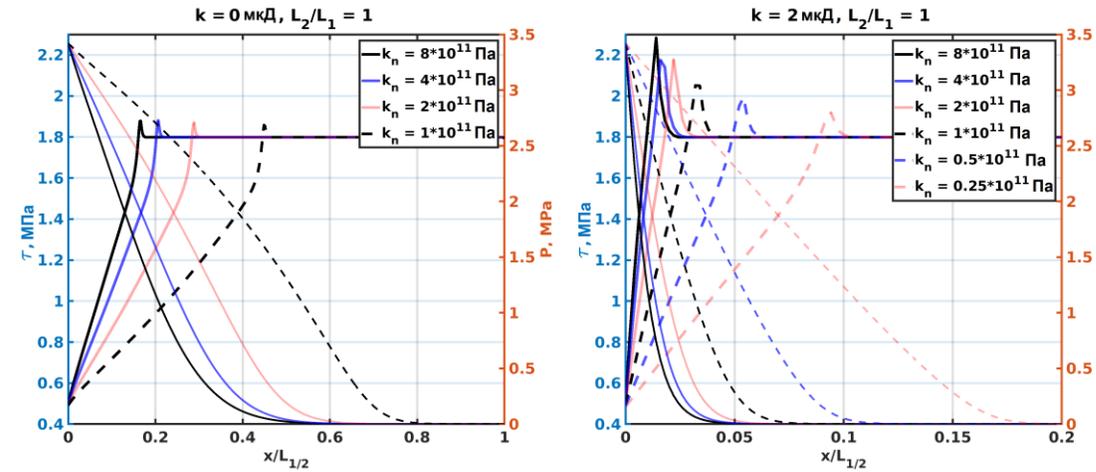


**Зона разупрочнения**      **Зона упрочнения**



Слева: профиль скорости. Справа: изменение касательного напряжения, вызванное деформацией разлома. Различный цвет соответствует различным моментам времени. Черной линией показано распределение значений комплекса параметров  $b_1+b_2-a$ , определяющих положение зон разупрочнения

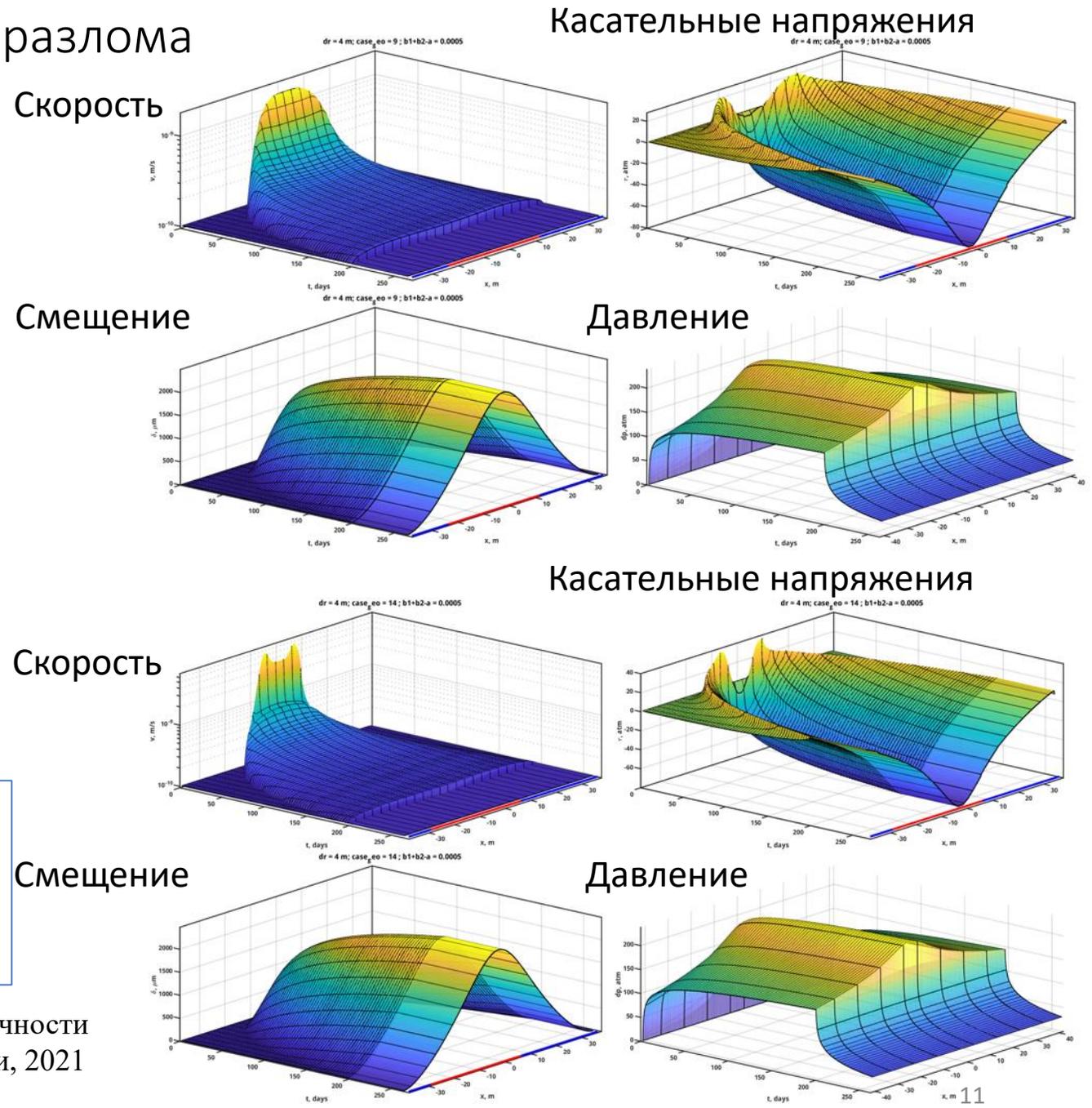
# Влияние параметров закачки и свойств разлома на процесс скольжения



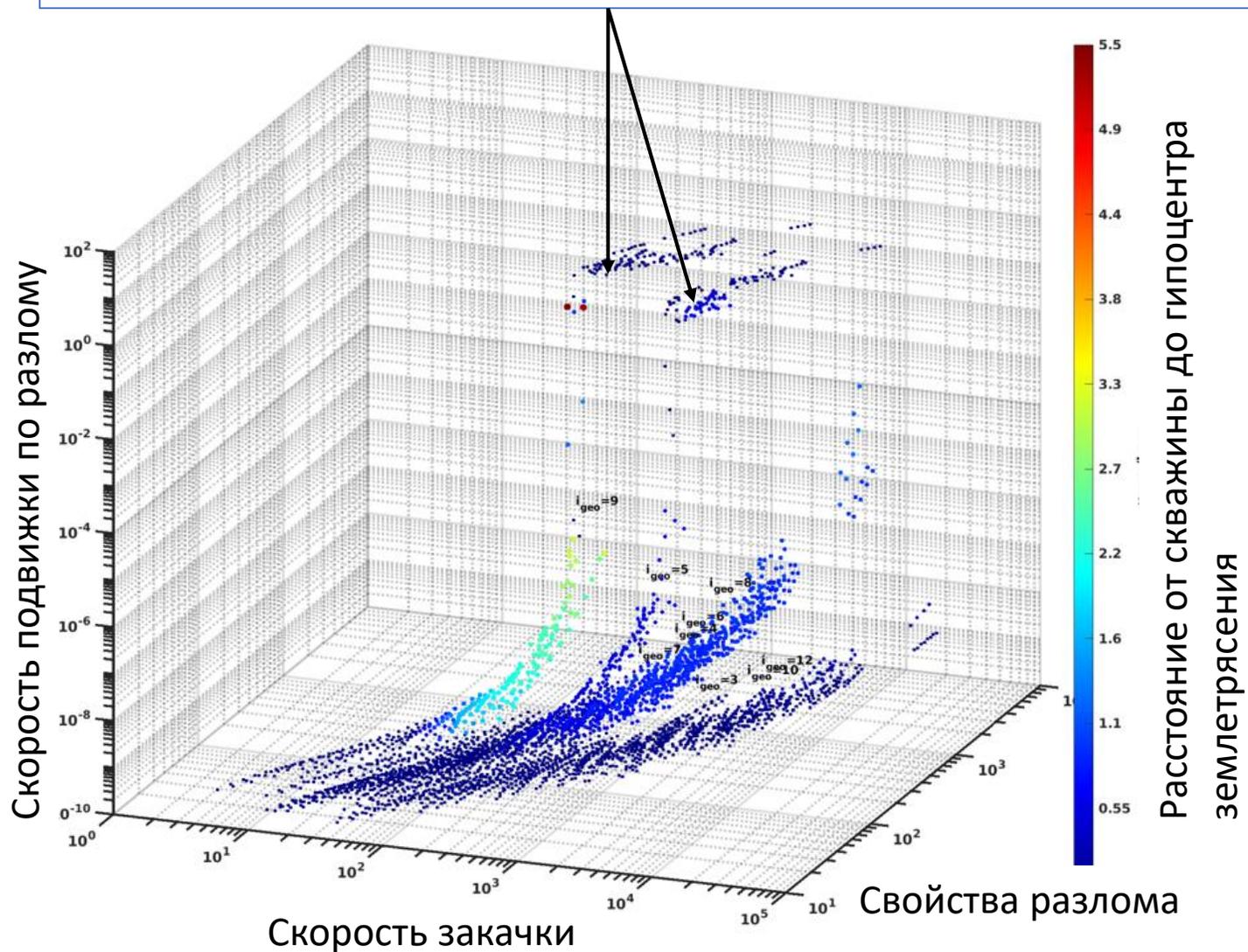
Профили вдоль полудлины для касательного напряжения и порового давления в конце расчета для различных значений нормальной жесткости и поровой проницаемости породы ( $\tau_0 = 1.8$  МПа):  
 а - непроницаемая порода, *b* - малопроницаемая порода.

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

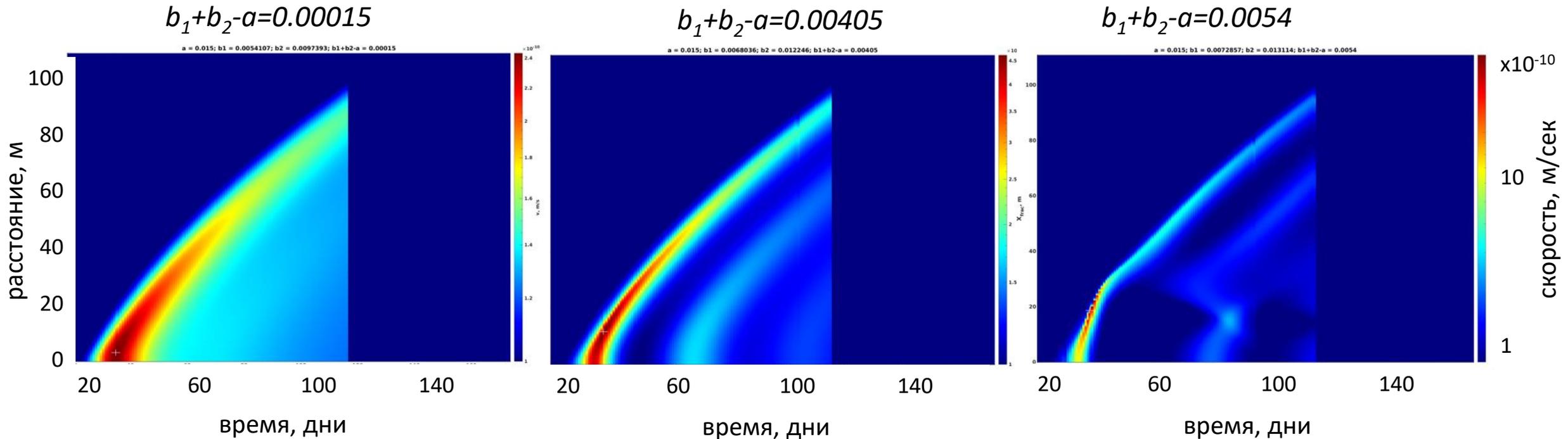


Начало появления сейсмических событий при росте скорости и объемов закачки для разных тектонических разломов (расчет).



Движения по разлому, вызванные изменением порового давления жидкости, могут происходить в форме медленных подвижек или приводить к землетрясениям. Реализация того или иного типа движения определяется скоростью и объемами закачки и условиями на разломе. Выполнены численные расчеты, в которых моделировались последствия закачки жидкости длительностью от 1.5 месяцев до 6 лет. В расчетах варьировались объем закачанной жидкости, расход при закачке, фрикционные свойства разлома, касательные напряжения на разломе. Найдено, что при определенных комбинациях параметров разлома и расхода жидкости возникают сейсмогенерирующие подвижки. Переход к такому режиму в рамках рассмотренной модели происходит скачкообразно.

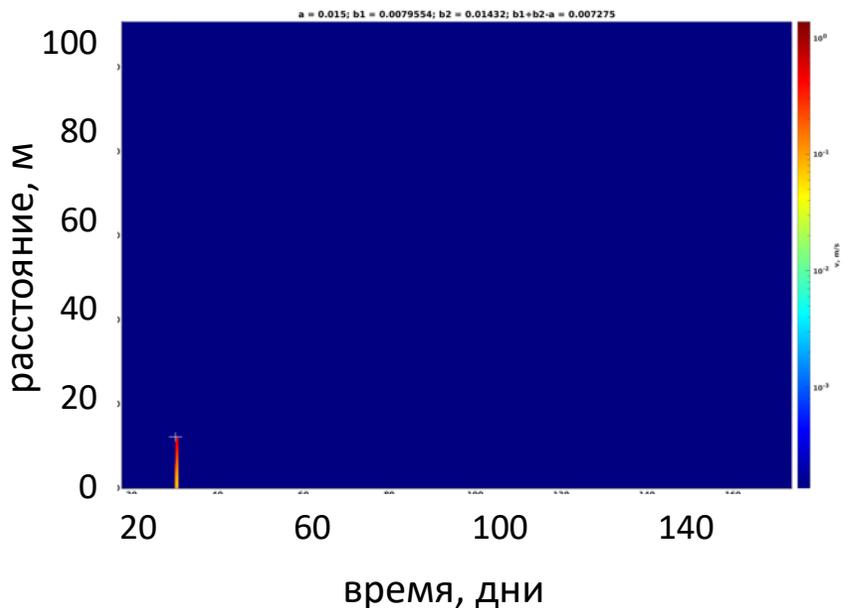
# Асейсмичное скольжение в результате закачки.



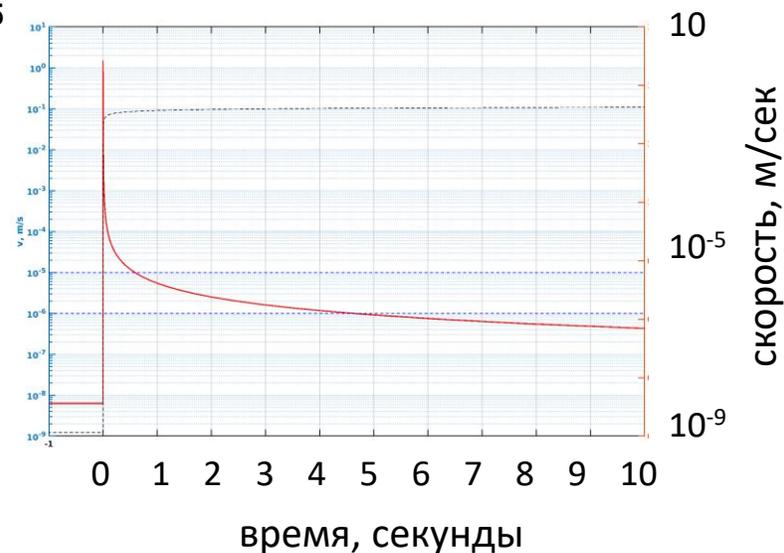
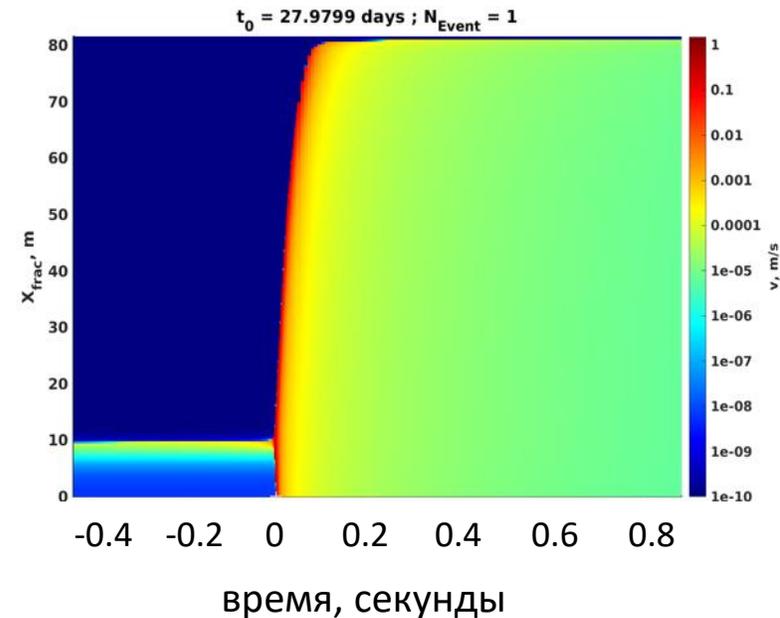
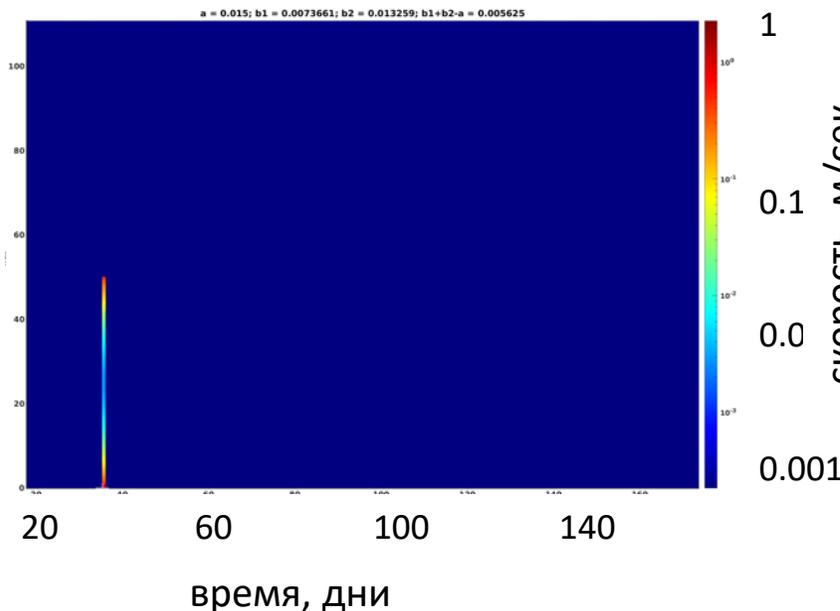
Влияние параметра двухпараметрического закона трения rate-and-state ( $b_1 + b_2 - a$ ) на движение по разлому при закачке жидкости: ось x – время от начала закачки в днях; ось y – положение точки разлома, в которой в данный момент времени достигается максимальная скорость скольжения; цветом показано значение максимальной скорости скольжения в данном месте в данное время.

# Сейсмические события в результате закачки

$$b_1 + b_2 - a = 0.0073$$



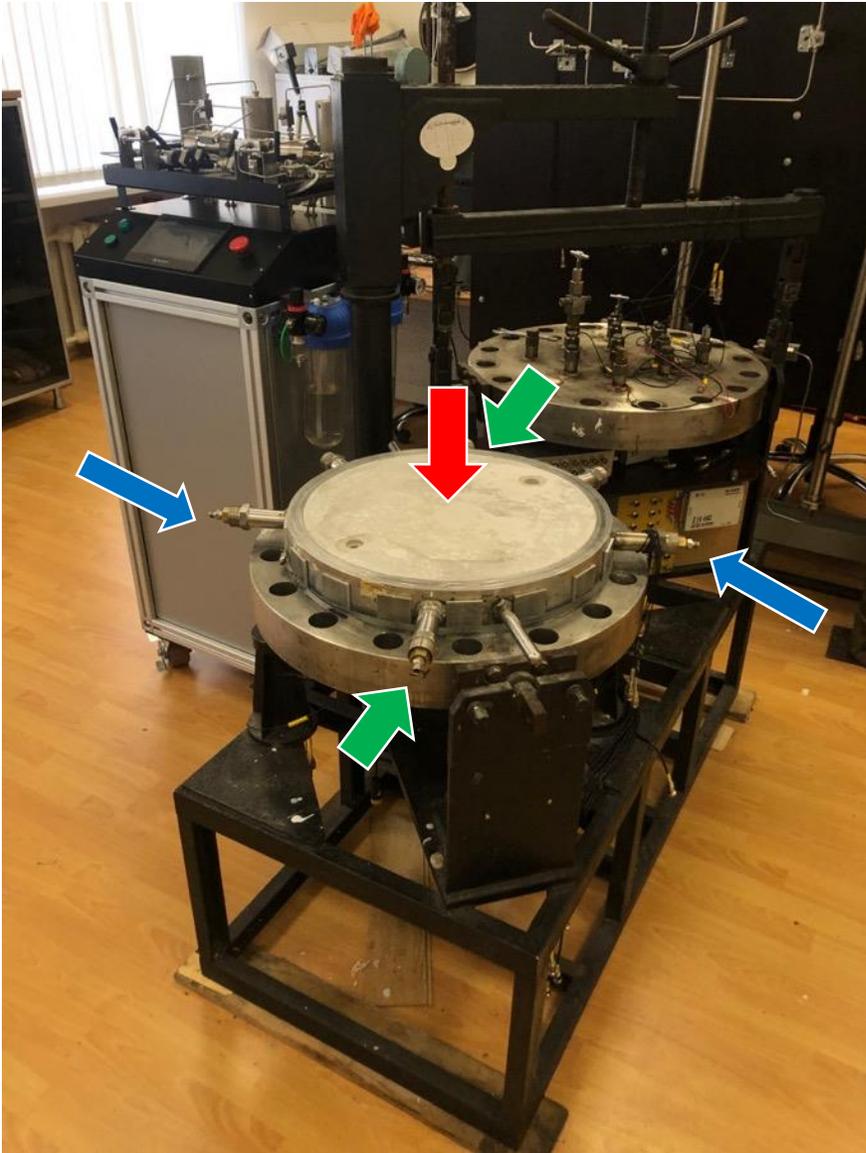
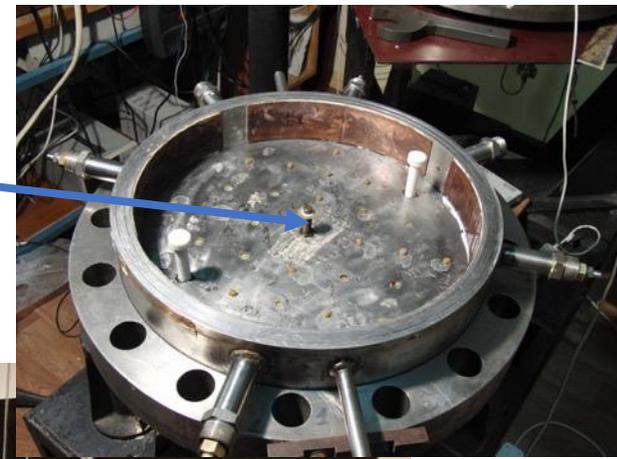
$$b_1 + b_2 - a = 0.0056$$



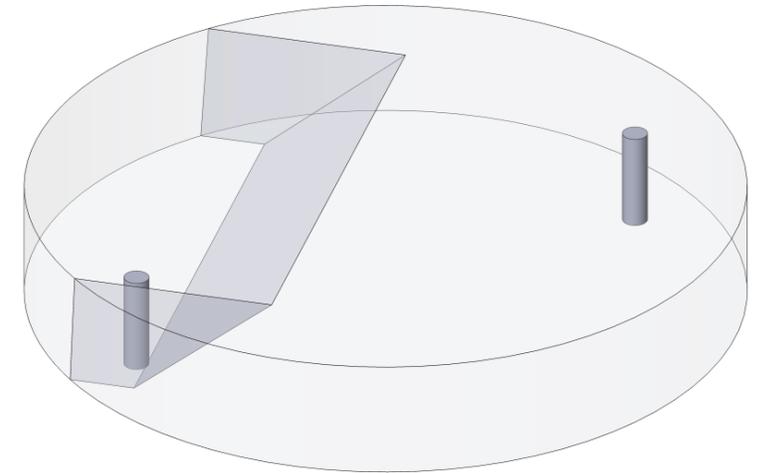
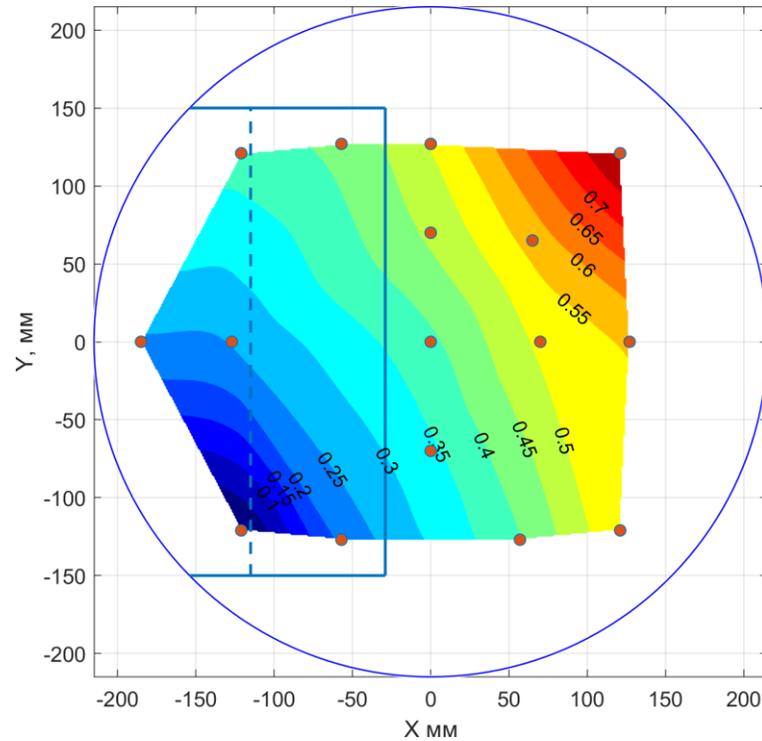
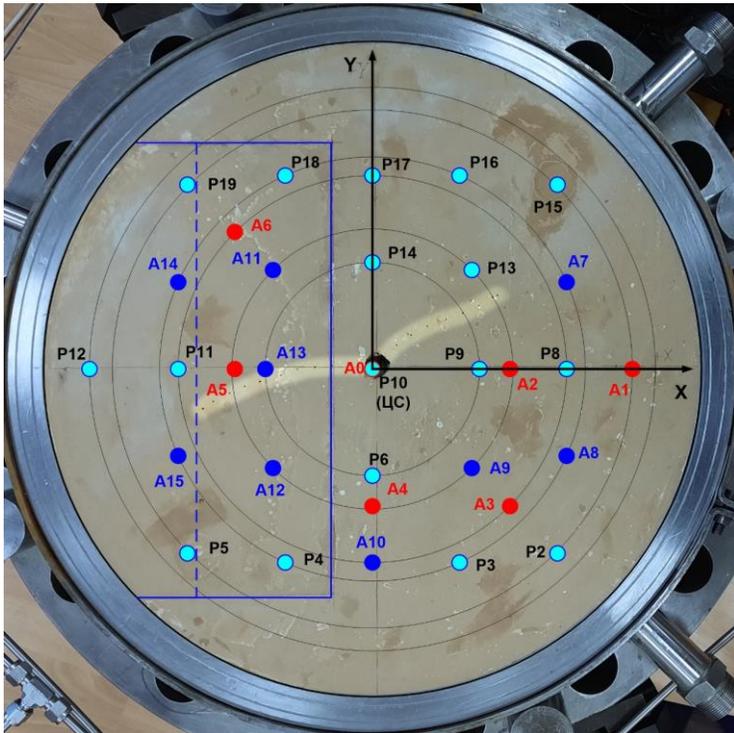
Влияние параметра двухпараметрического закона трения rate-and-state ( $b_1 + b_2 - a$ ) на движение по разлому при закачке жидкости: ось  $x$  – время от начала закачки в днях; ось  $y$  – положение точки разлома, в которой в данный момент времени достигается максимальная скорость скольжения; цветом показано значение максимальной скорости скольжения в данном месте в данное время.

Изменение скорости подвижки в точке ее начала

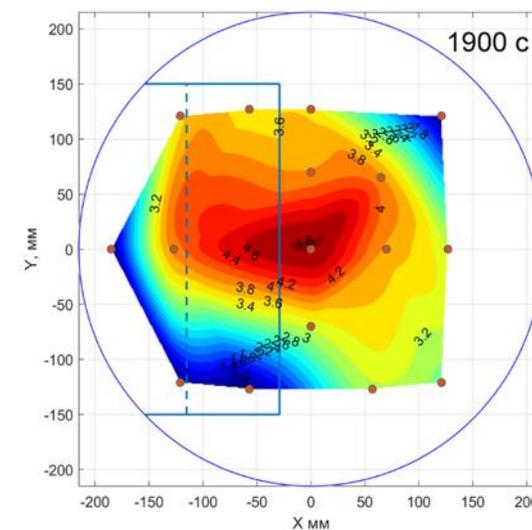
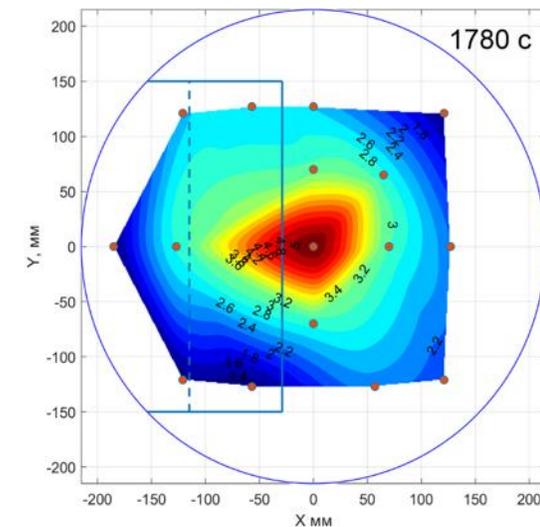
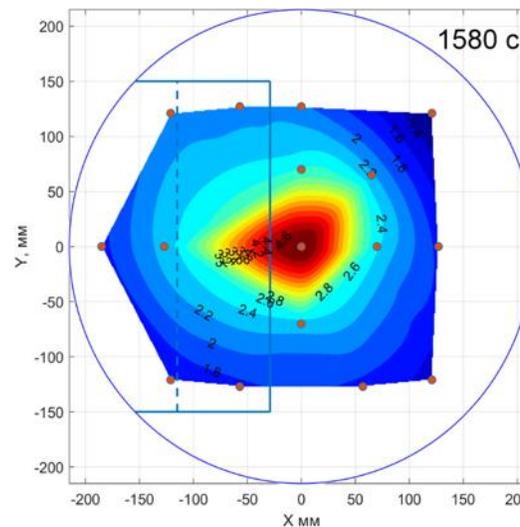
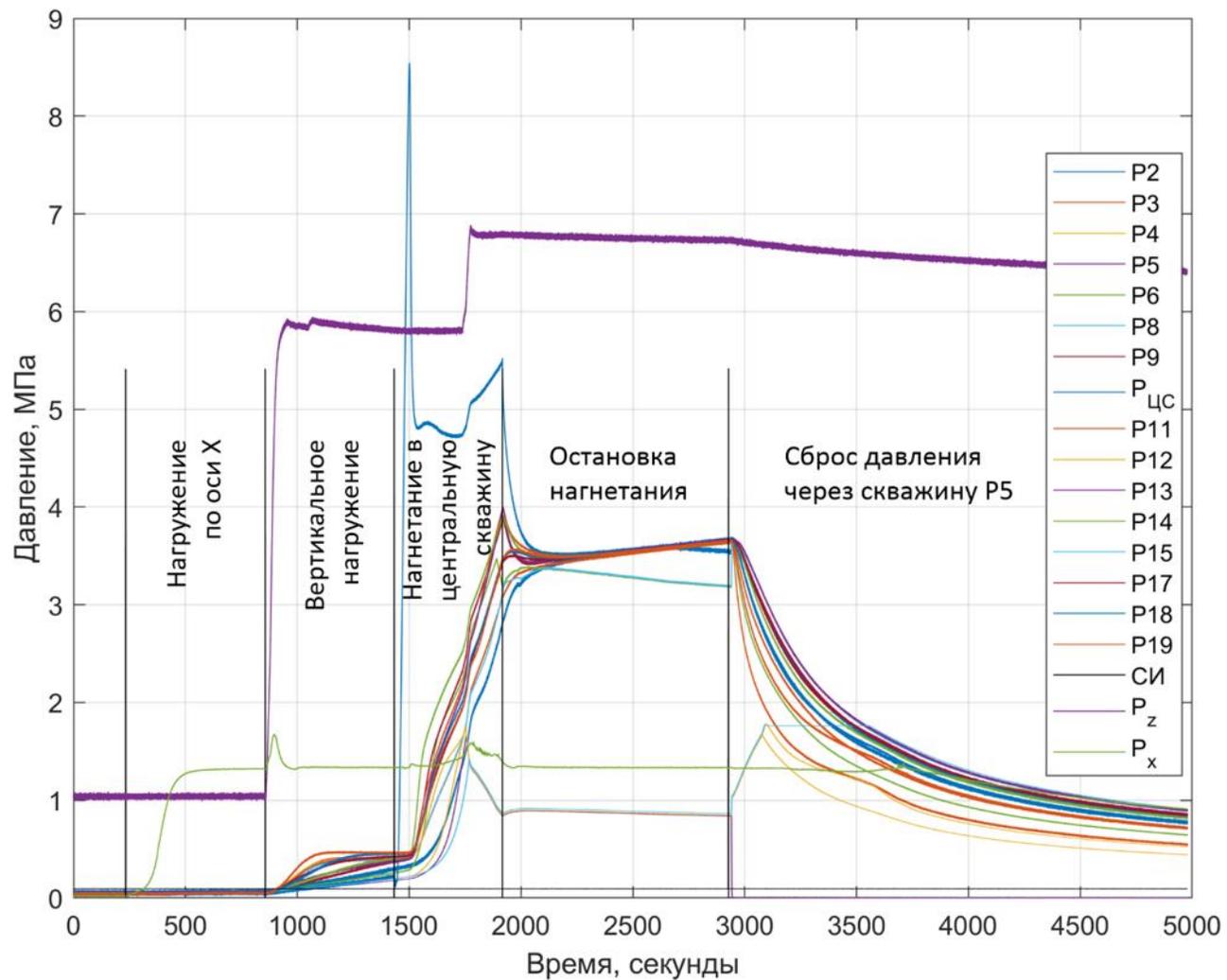
# Экспериментальная установка



# Эксперименты с предварительно созданной трещиной

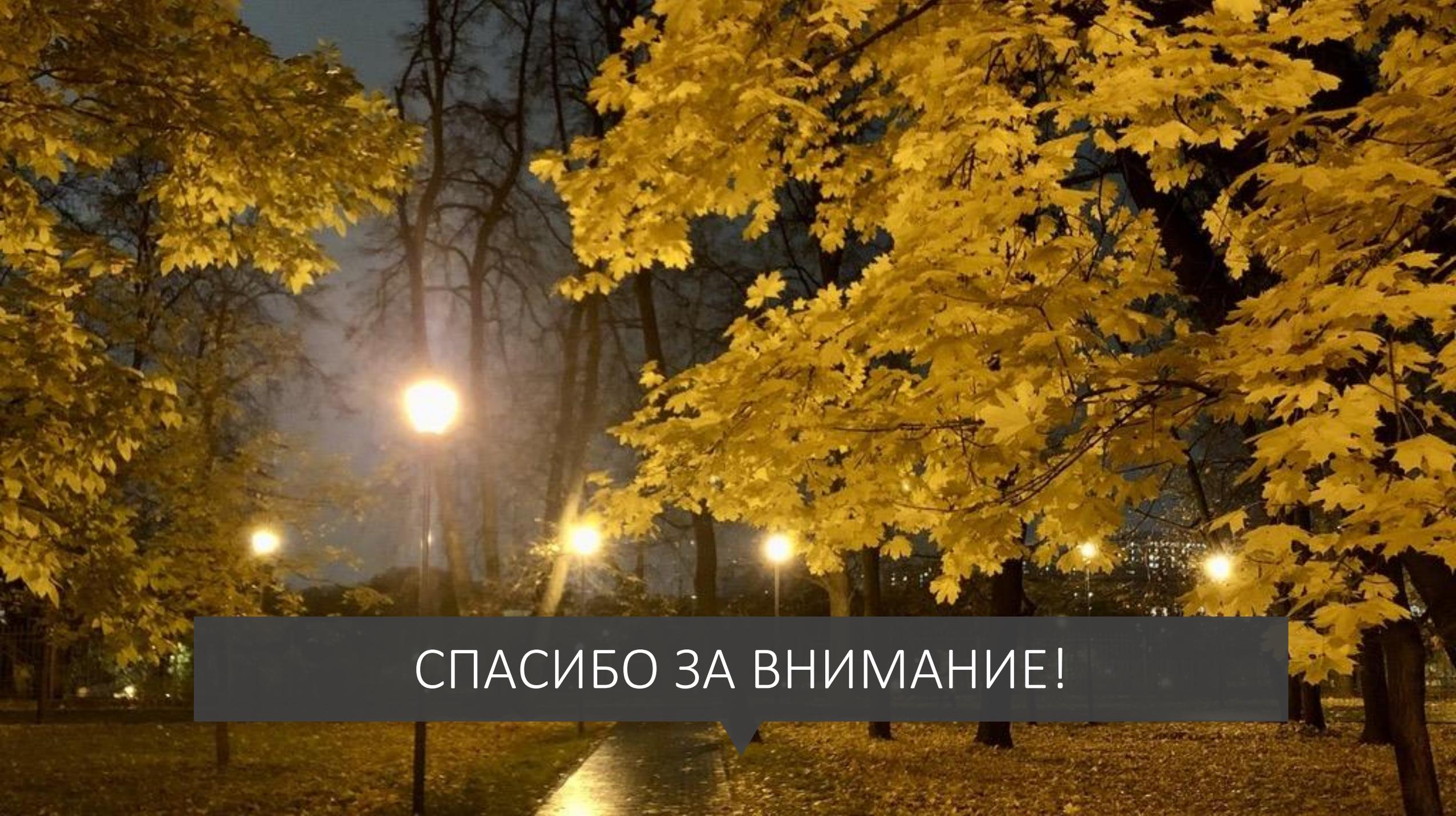


# Взаимодействие трещины ГРП с заранее созданной трещиной



# Выводы

- Использование двухпараметрического варианта закона трения rate-and-state позволяет более адекватно описывать подвижки по разломам в сравнении с однопараметрическим вариантом.
- Движения по разлому, вызванные изменением порового давления жидкости, могут происходить в форме медленных подвижек или приводить к землетрясениям. Реализация того или иного типа движения определяется параметрами закачки и условиями на разломе.
- При определенных комбинациях параметров разлома и значений расхода жидкости возникают сейсмогенерирующие подвижки.
- Переход к такому 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.
- Использование предложенной в работе модели позволит определить диапазон значений параметров трения на основе анализа данных по сейсмичности, индуцированной закачкой. Знание параметров трения будет использоваться для прогноза развития сейсмичности в районах закачки жидкости.

A night scene of a park path. The path is illuminated by several streetlights, creating a warm, golden glow. The trees are covered in bright yellow autumn leaves, and the ground is covered in fallen leaves. The sky is dark blue.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

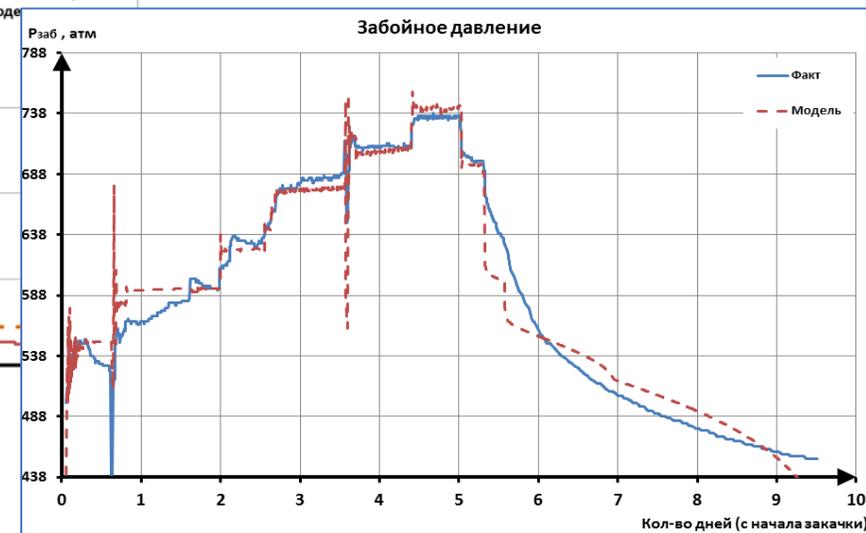
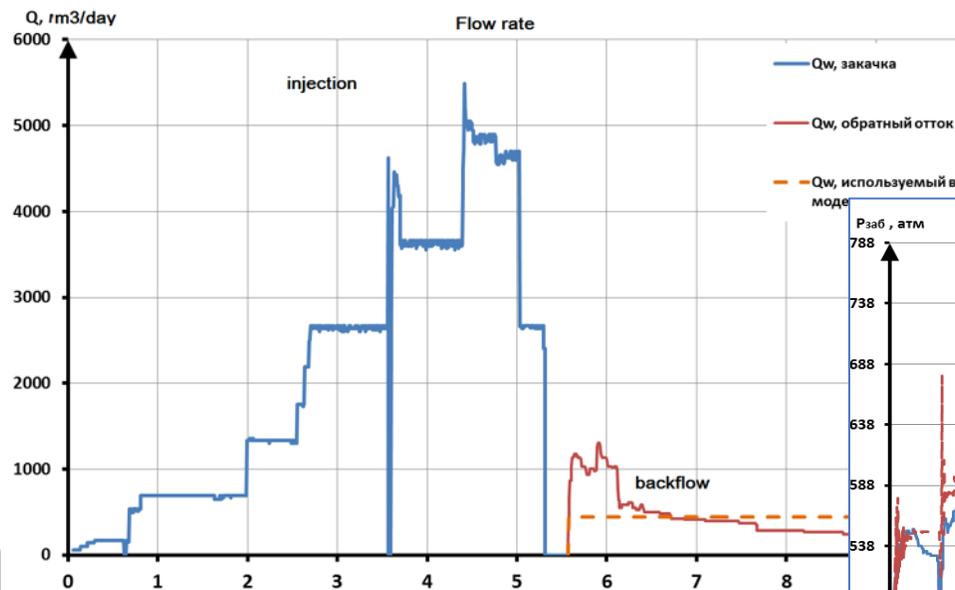
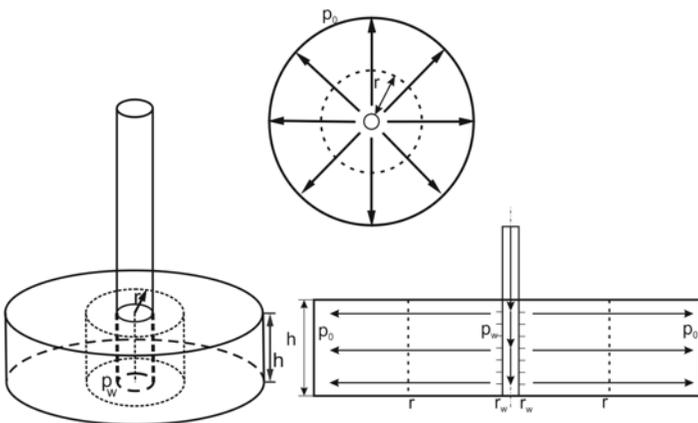
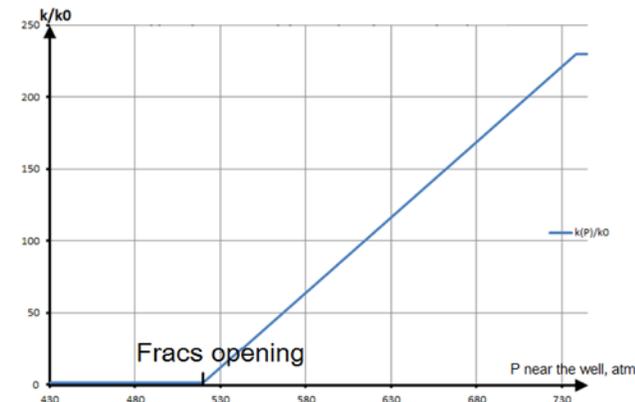
# Применение модели для случая Базеля

Изменение давления в результате закачки жидкости (фильтрация радиальная):

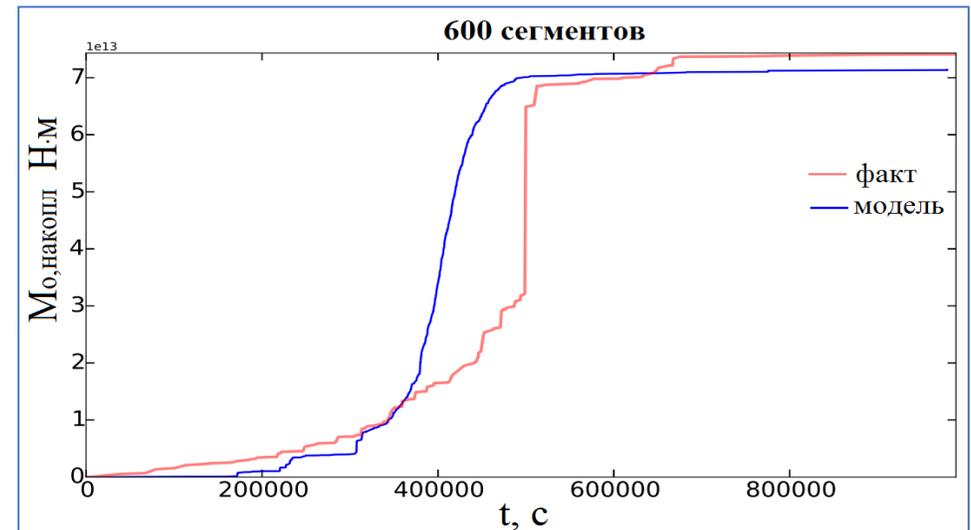
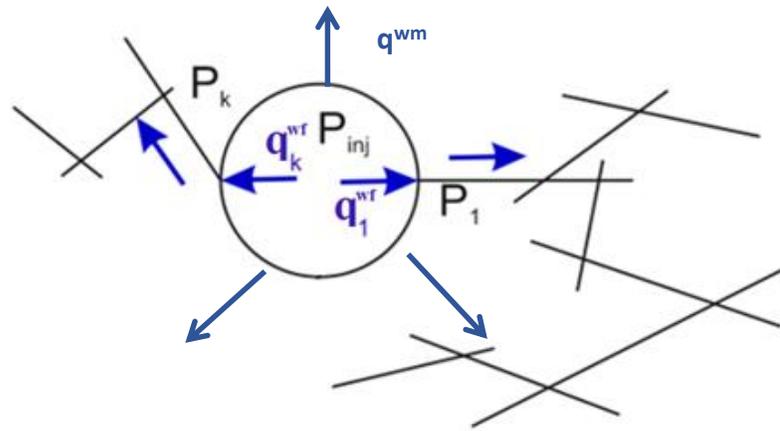
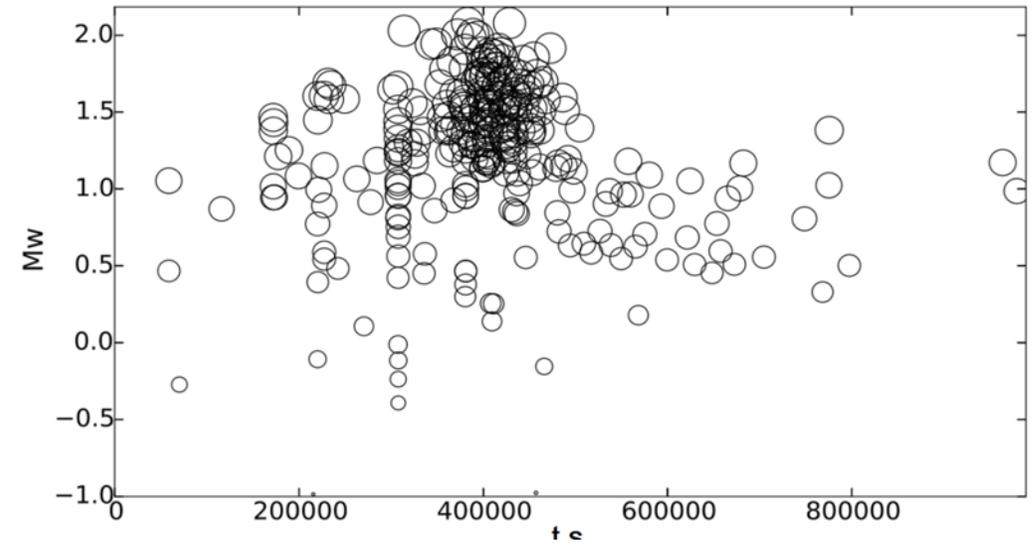
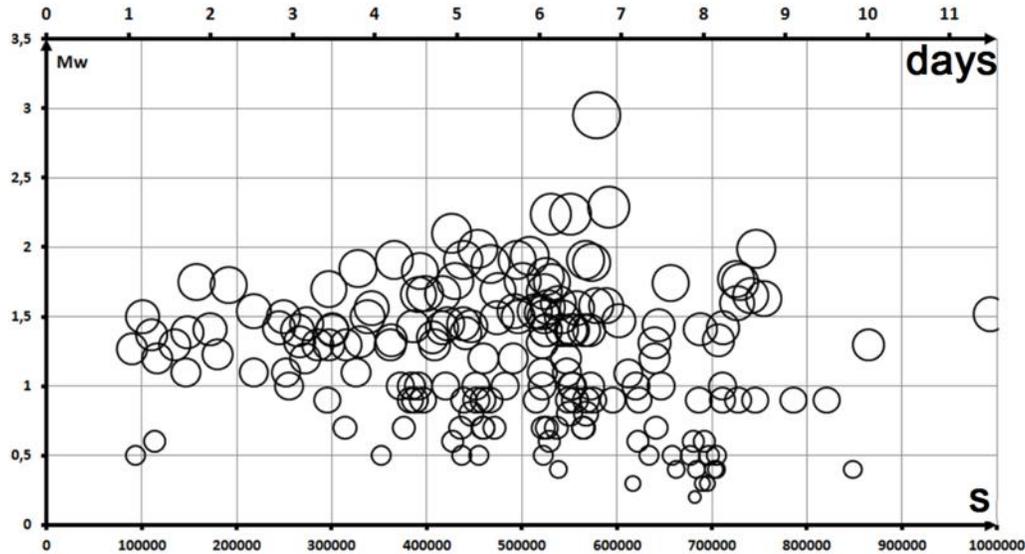
Значения параметров взяты близкими к параметрам, характеризовавшим систему скважина-резервуар проекта Базель (Häring et al., 2008, Dinske, 2010):  $r = 100$  м,  $Q_0 = 1.5$  м<sup>3</sup>/мин,  $p_0 = 44$  МПа,  $\mu = 0.284$  Па·с,  $h = 46$  м,  $k = 4$  мД

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

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



# Применение модели для случая Базеля



# Возможные сценарии развития сейсмичности при закачке

