

Статистическое моделирование динамики
микросейсмических событий при росте порового
давления для восстановления параметров напряжённого
состояния пласта

Н.А. Барышников, С. Б. Турунтаев

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН

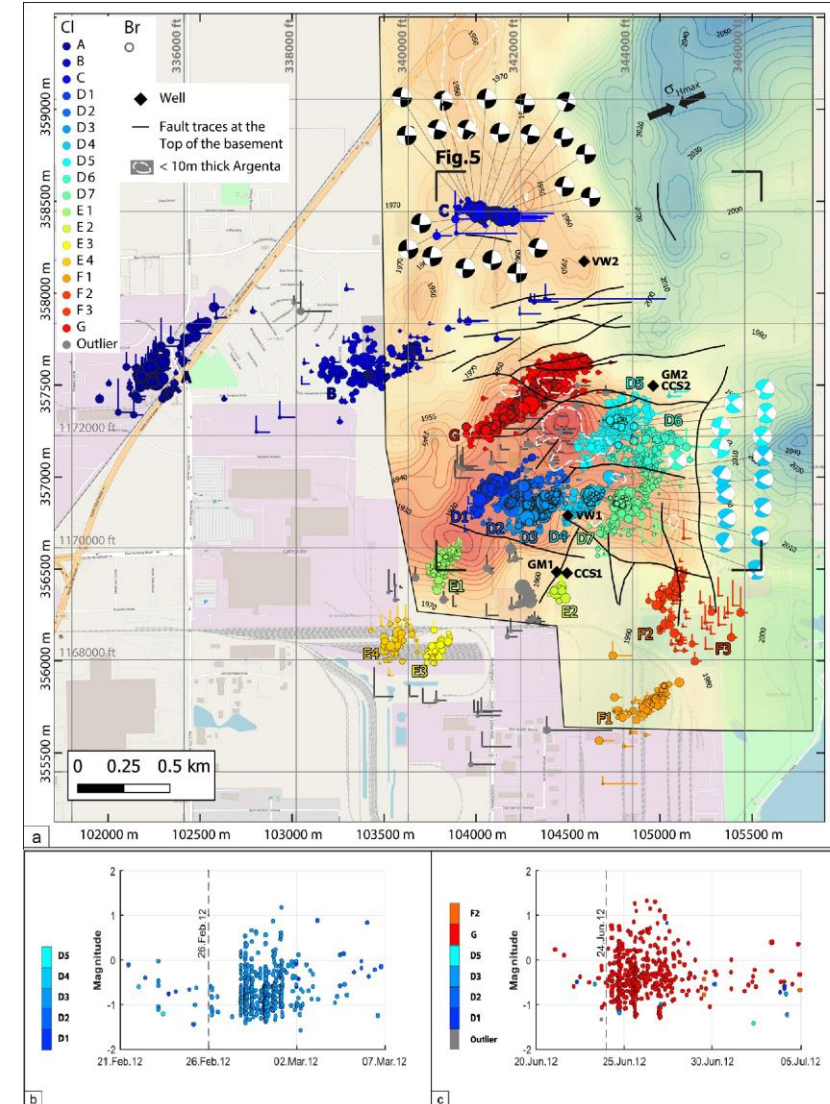
г. Коломна, 21.05.2026

Индукцированная микросейсмичность при закачке флюидов.

Цель работы: Изучение возможности получения информации о параметрах напряженного состояния и характеристиках трещиноватости среды по данным о динамике возникновения микросейсмических событий, инициируемых закачкой жидкости.

Задача: Создание методики для восстановления величины максимального горизонтального напряжения пласта по виду кривой зависимости количества микросейсмических событий, индуцированных закачкой жидкости, от времени.

- При закачке жидкости в некоторой локальной области повышается поровое давление → инициируются микросейсмические события.
- Динамика событий отражает эволюцию эффективных напряжений.
- Идея: использовать форму кривой «число событий – поровое давление» для восстановления параметров напряженного состояния пласта, в частности, величины промежуточного главного напряжения



Decatur carbon capture and storage site (IL, USA), Dichiarante et al., 2021

Цикл решения задачи

Прямое моделирование

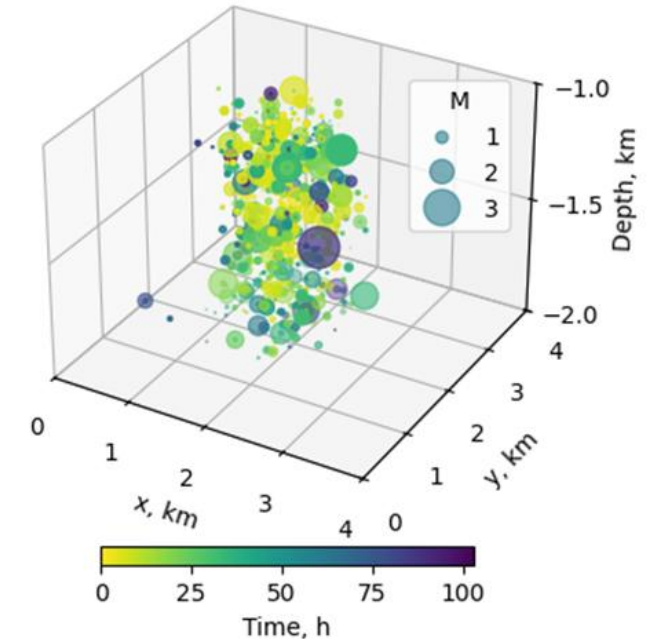
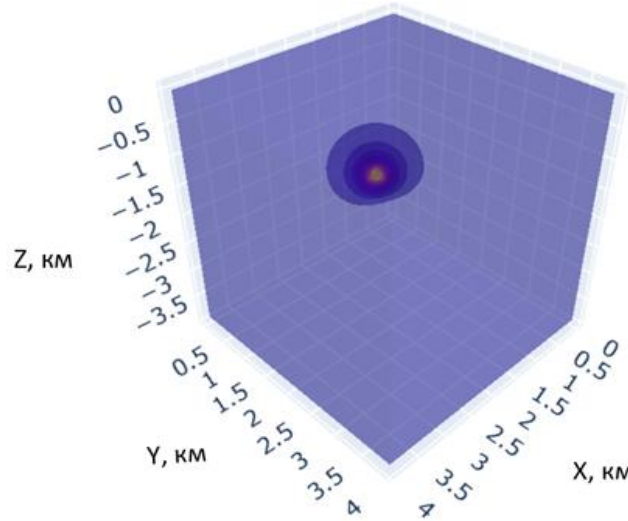
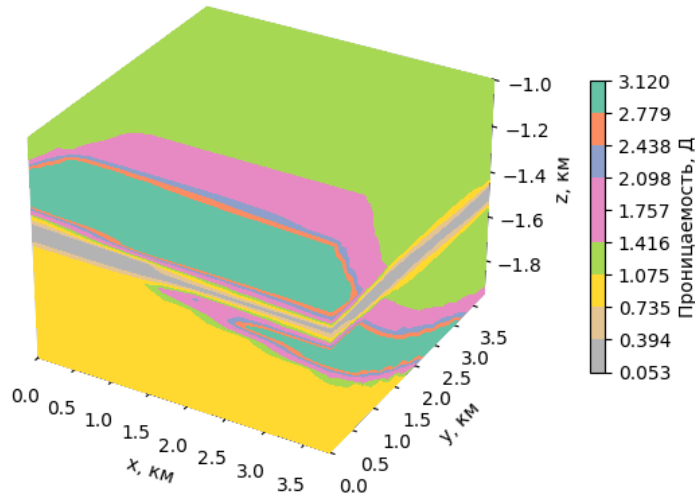
Задание параметров среды и напряжённого состояния



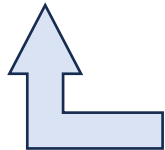
Гидродинамическое моделирование динамики порового давления в результате закачки флюида



Статистическое моделирование микросейсмических событий



Обратное моделирование

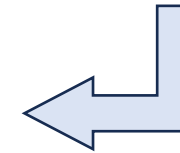


Решение обратной задачи:

- исследование алгоритмов
- ML-подходы
- анализ ошибок



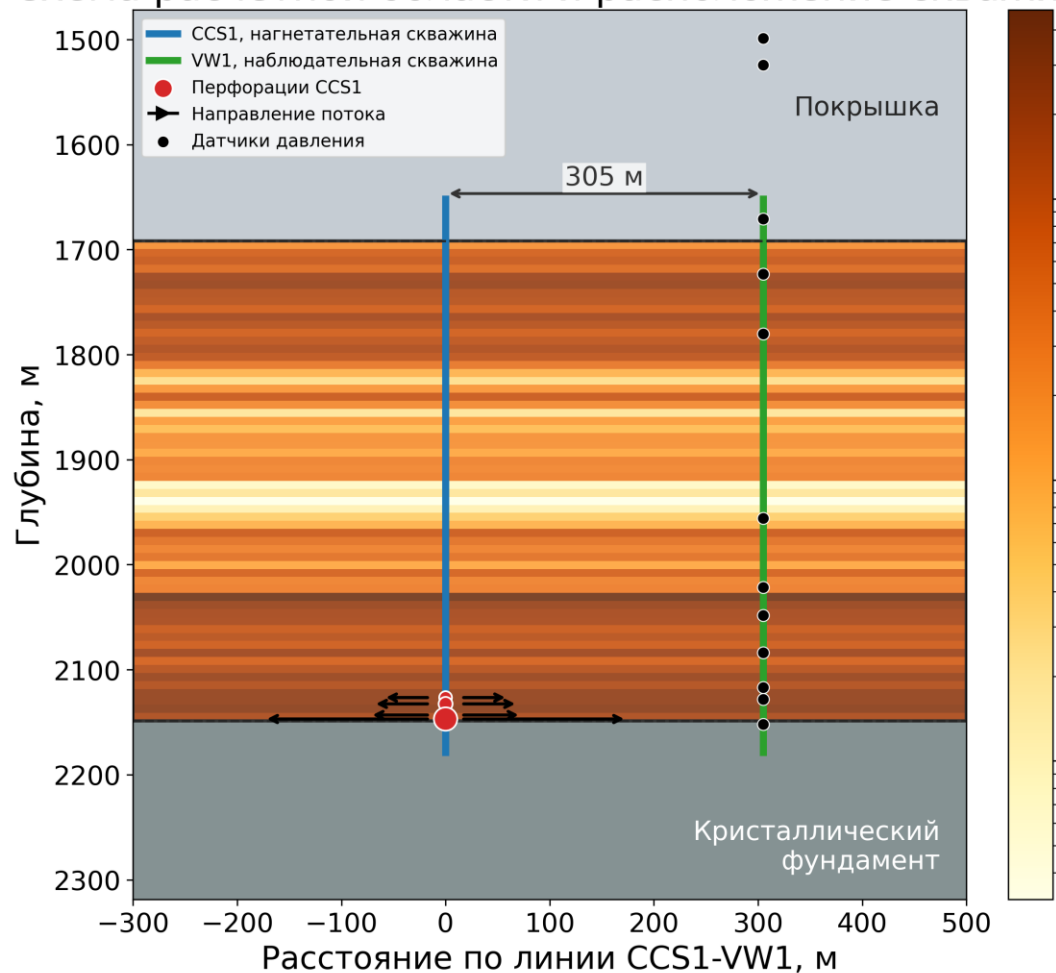
Формирование базы данных синтетических каталогов



Методика прямого моделирования распространения порового давления в результате закачки флюида в неоднородной анизотропной среде

Модель среды:

Схема расчетной области и расположение скважин



Decatur carbon capture and storage site (IL, USA), Dichiarante et al., 2021

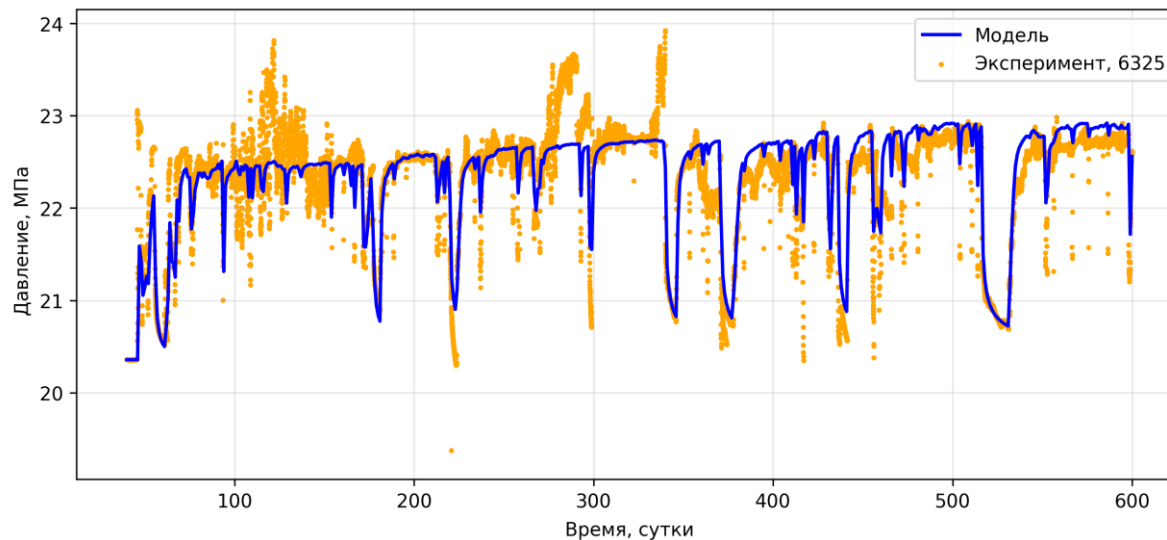
Система уравнений:

$$\frac{\partial p_f}{\partial t} = \nabla \cdot (\chi \nabla p_f) + q_p(\mathbf{x}, t)$$

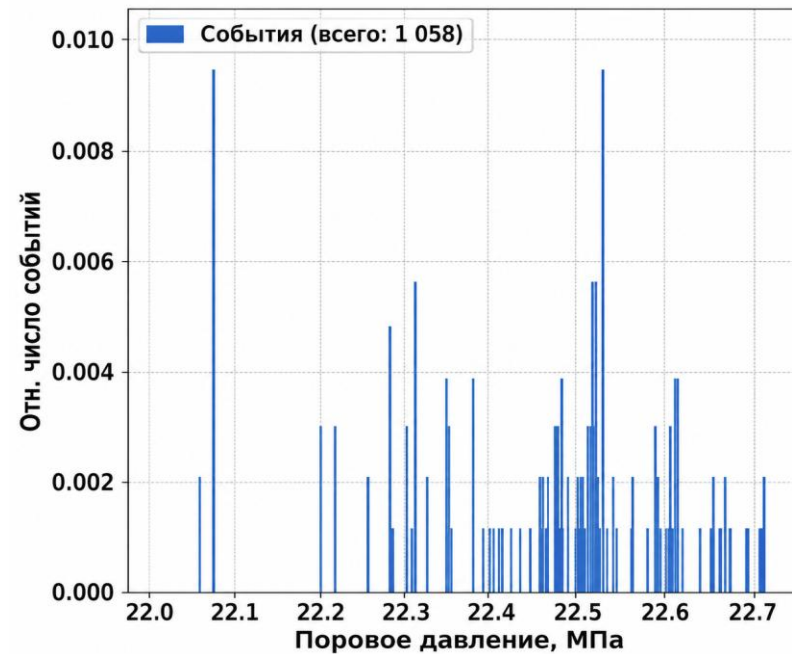
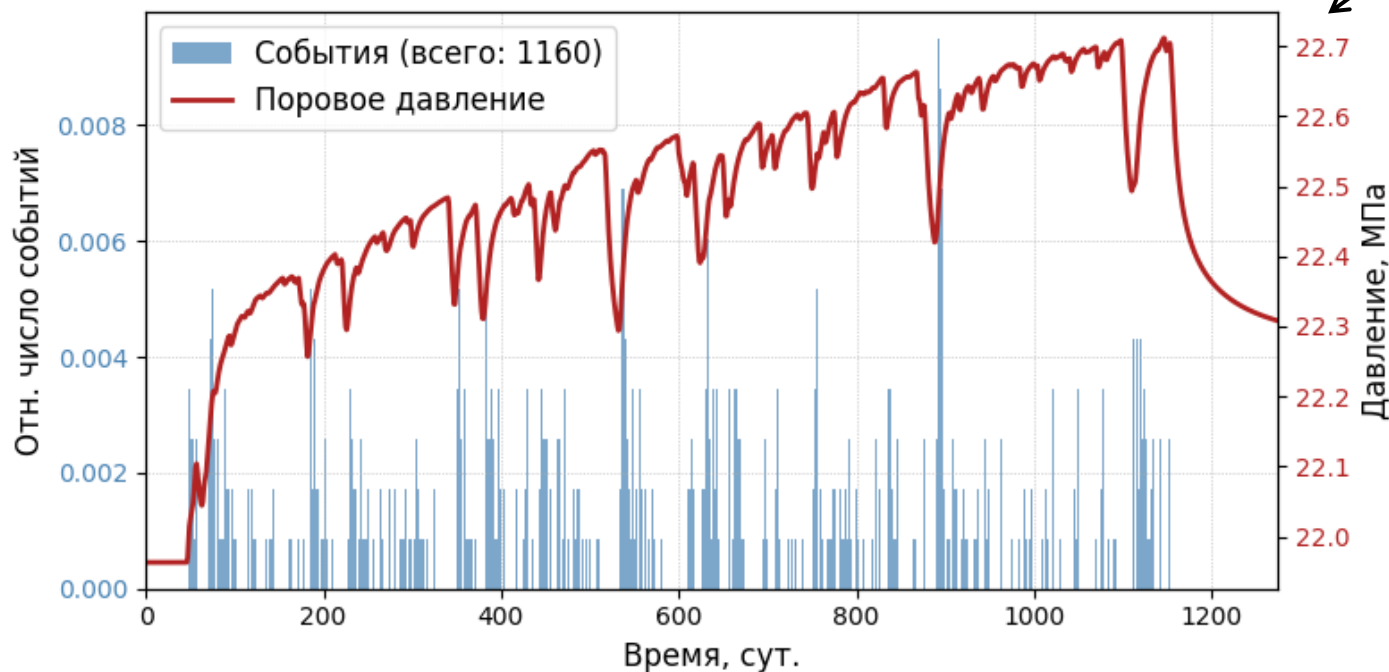
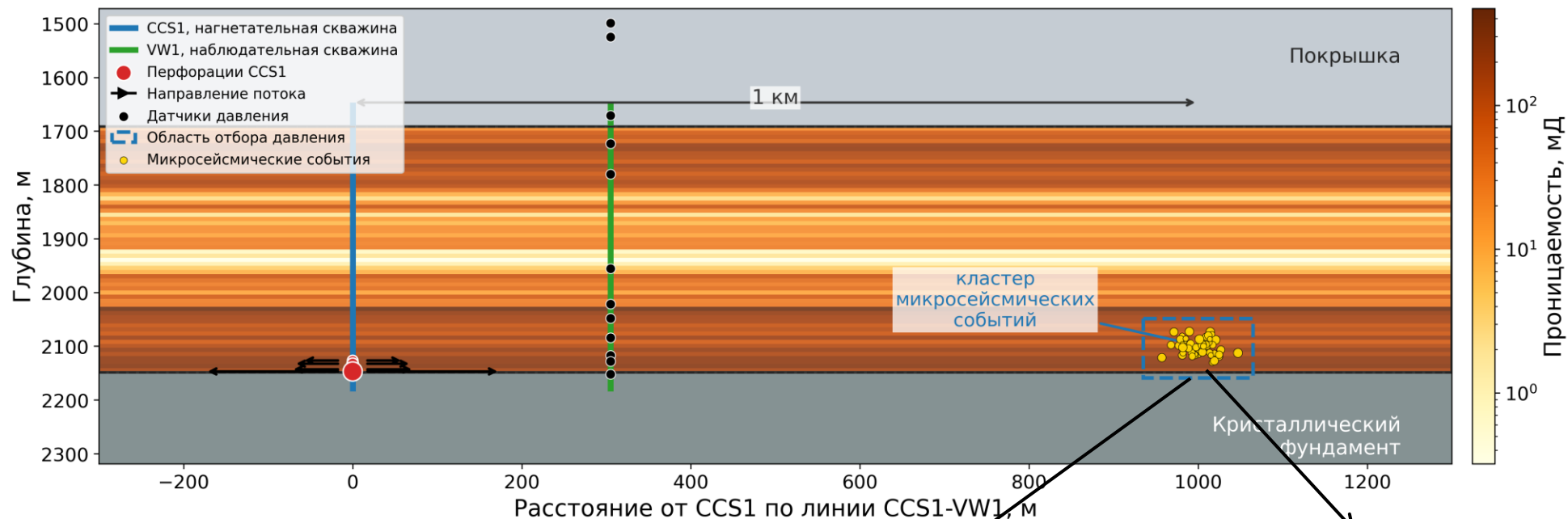
$$q_p(\mathbf{x}, t) = \frac{Q(t)}{\rho_{inj}} \left[m_{eff} \left(\frac{1}{K_{ro}} + \frac{1}{K_m} \right) \right]^{-1}$$

$$\chi = \frac{\mathbf{k}}{m\nu} \left(\frac{1}{K_{ro}} + \frac{1}{K_m} \right)^{-1} \quad p_f = p - \rho_f g h$$

Динамика давления в нагнетательной скважине:

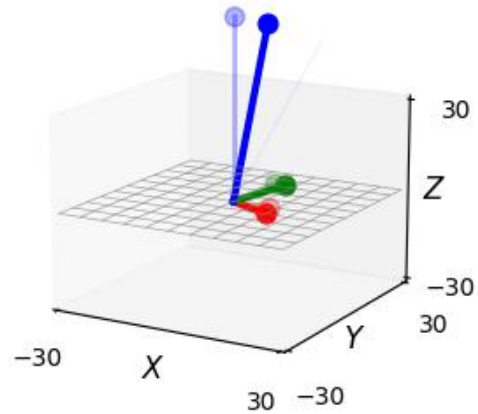


Использование динамики давления в целевой области при моделировании микросейсмичности



Статистическое моделирование микросейсмических событий в процессе изменения порового давления

1. Тензор напряжений задаётся через величины главных компонент и углы поворота



$$\sigma^P = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}$$

$$\sigma = R \sigma^P R^T$$

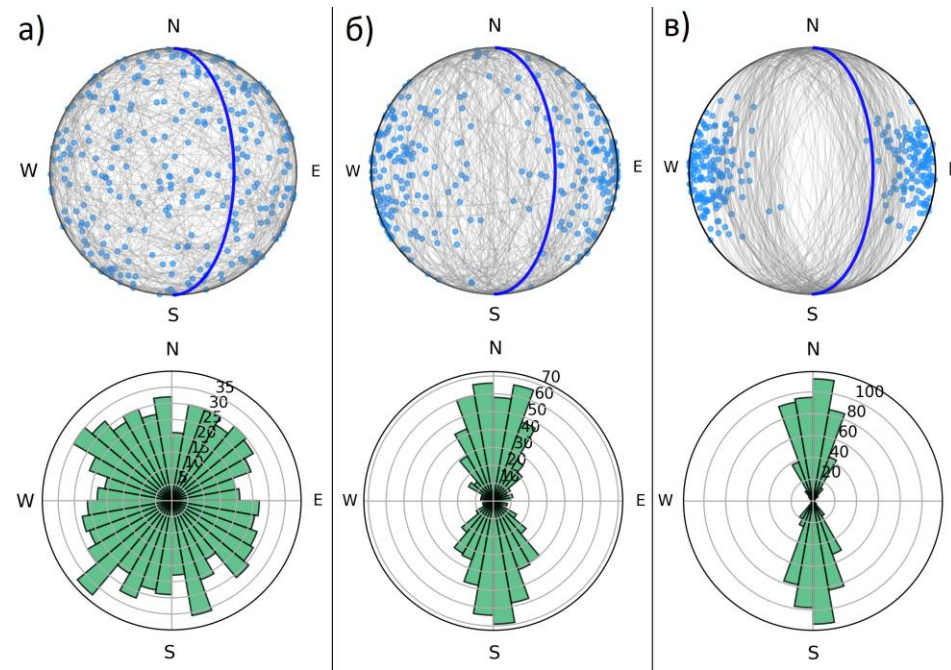
[Pakuz-Charrier et al., 2018]

[Дубиня, Тихоцкий, 2022]

2. Задаётся ансамбль из N инициаторов – трещин. Ориентации задаются сферическим распределением Фишера вокруг выделенного направления

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh(\kappa)} \exp(\kappa \cos\theta)$$

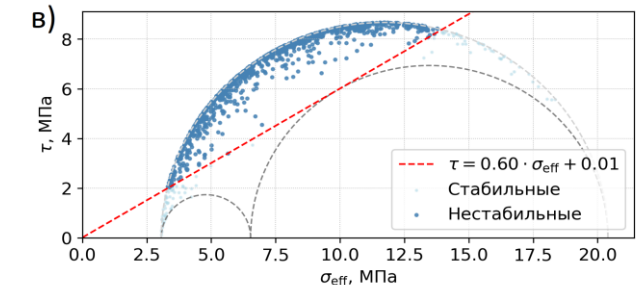
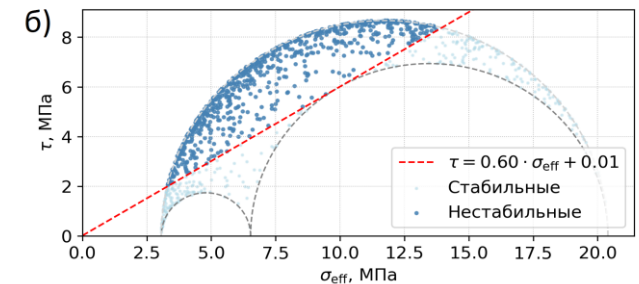
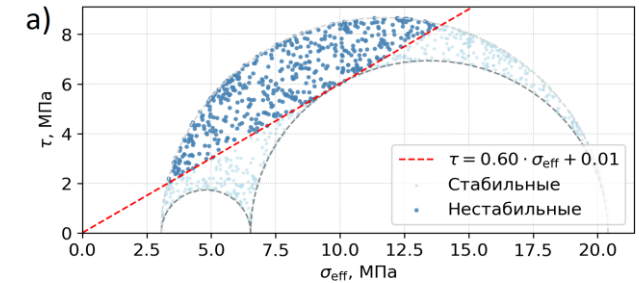
κ – параметр кучности



а) $\kappa = 0,01$ б) $\kappa = 5$ в) $\kappa = 15$

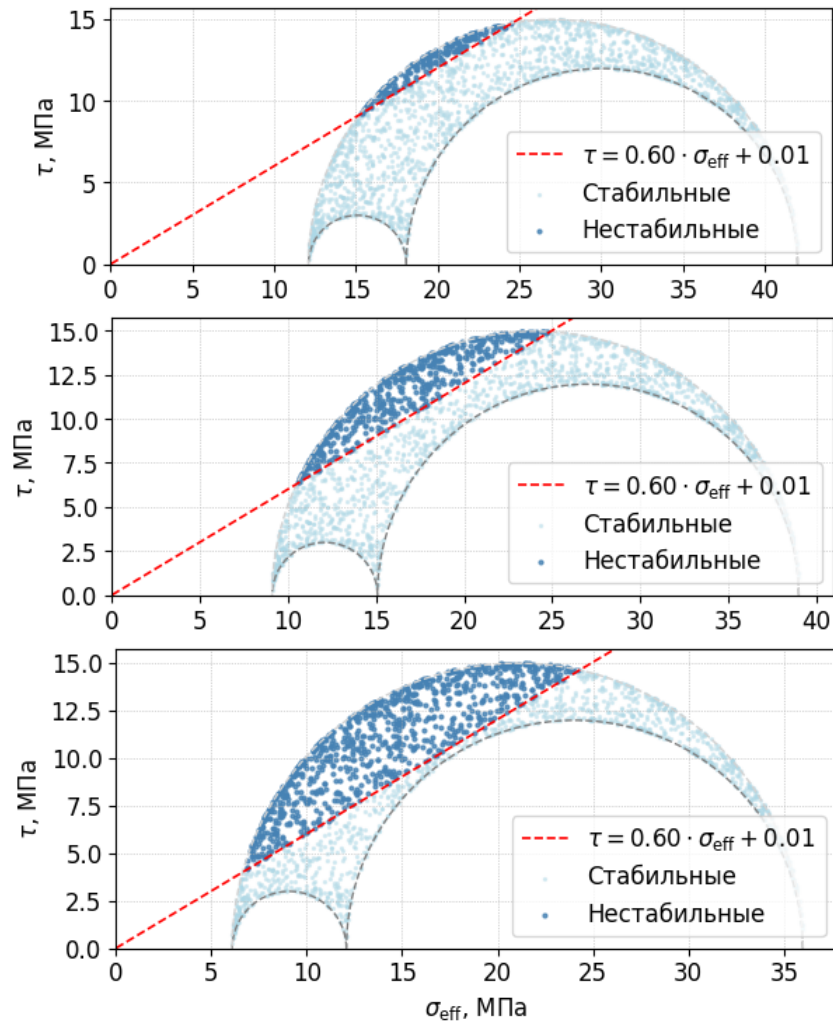
3. Для каждой трещины строится проекция нормального и касательного напряжения на диаграмме Мора

$$\sigma_{n,i} = |\mathbf{n}_i^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_i| \quad \tau_i = |\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_i - \sigma_{n,i} \mathbf{n}_i|$$



Численное моделирование микросейсмических событий в процессе роста порового давления

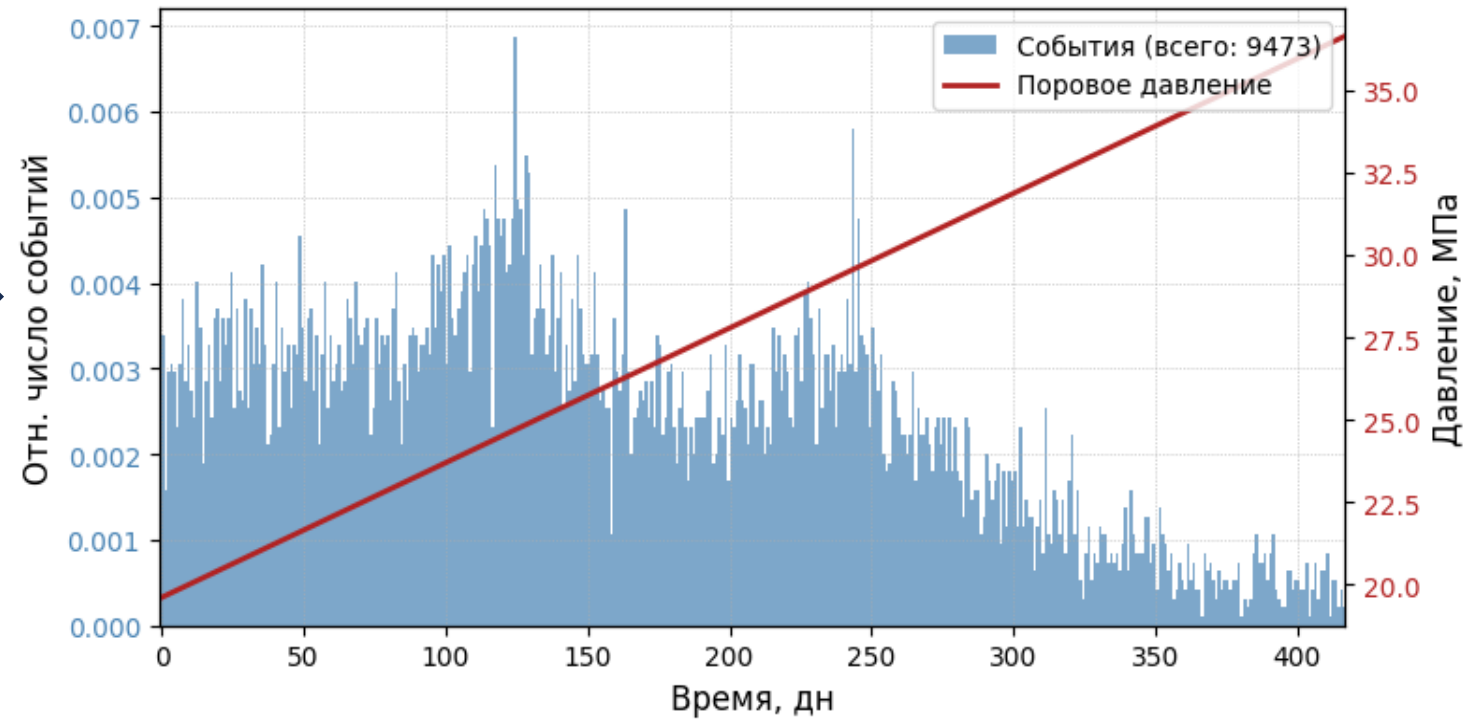
4. По мере роста порового давления вычисляется доля инициаторов, для которых выполнен критерий Мора - Кулона:



$$F_i(t) = \tau_i - \mu(\sigma_{n,i} - p(t)) - C$$

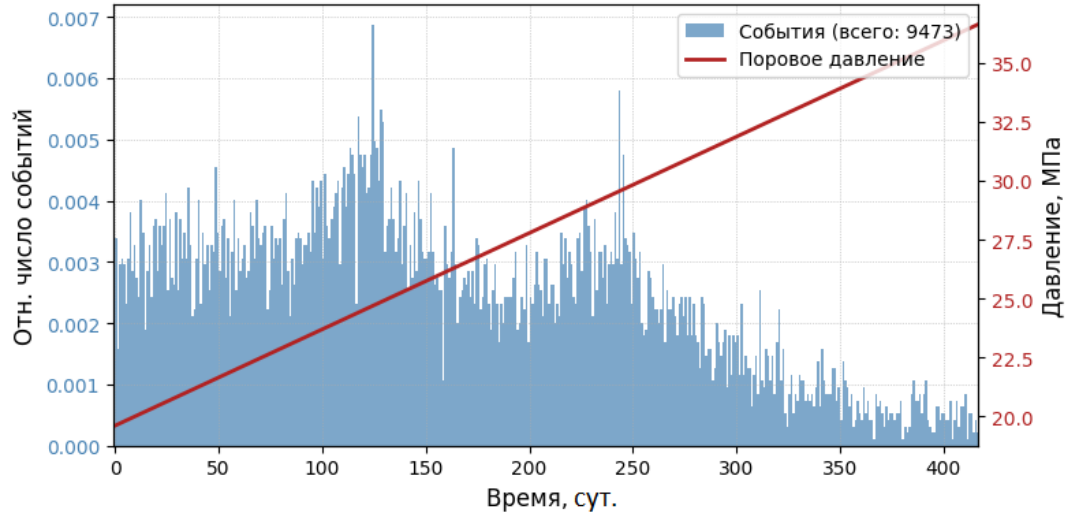
$$\Theta_i(t_m) = \begin{cases} 1, & F_i(t_m) > 0 \text{ и } F_i(t_{m-1}) \leq 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$E(t_m) = \sum_{i=1}^N \Theta_i(t_m) - \text{число событий на шаге } t_m$$

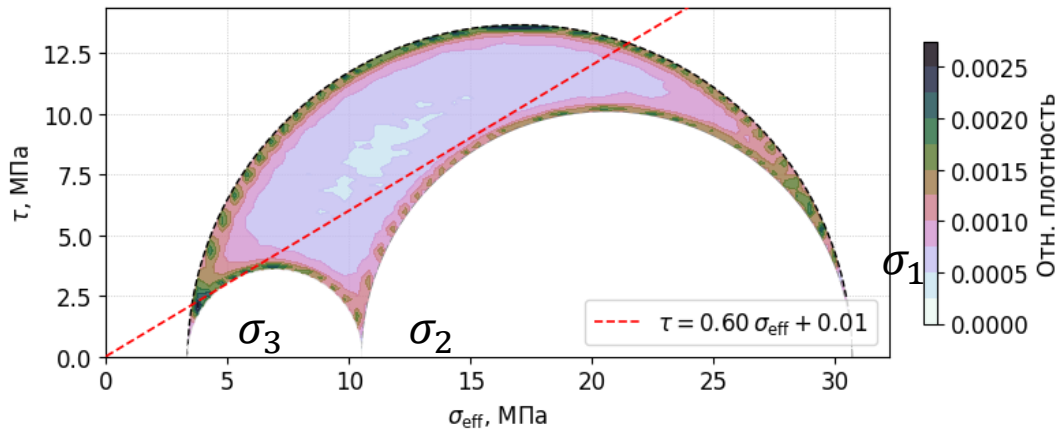


Численное моделирование микросейсмических событий в процессе роста порового давления

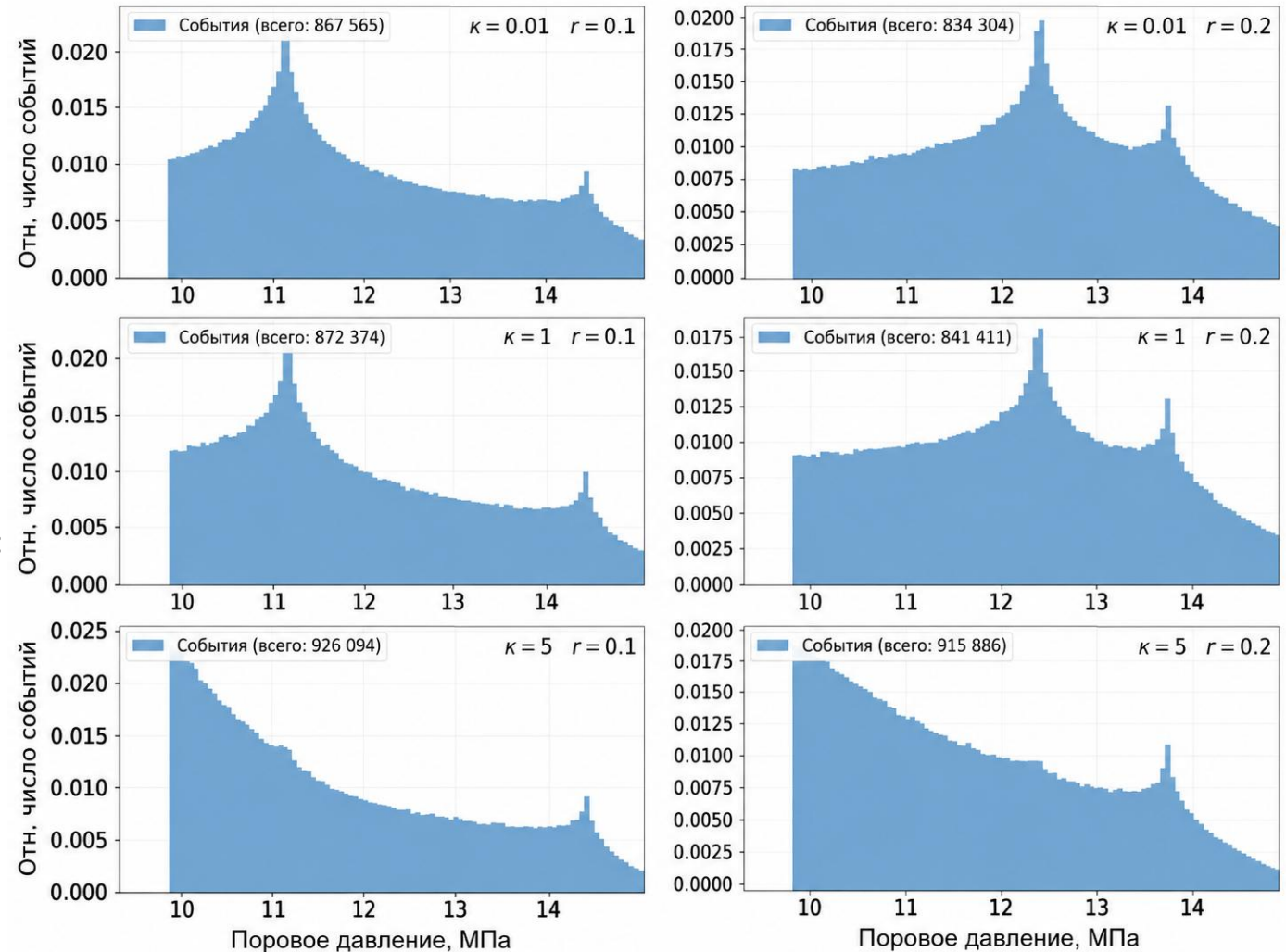
График содержит локальные максимумы, возникающие в моменты касания линией критерия Мора - Кулона кругов Мора :



Относительная плотность трещин-инициаторов на диаграмме Мора при почти изотропном ($\kappa = 0.01$) распределении ориентаций:



Синтетические зависимости плотности вероятности возникновения событий от порового давления для параметров кучности ($\kappa = 0,01, 1$ и 5) и коэффициентов Лоде-Надаи ($r = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = 0,1$ или $0,2$)



Исследование возможности восстановления σ_2 (либо r) по кривой из $N = 100 \div 50000$ событий

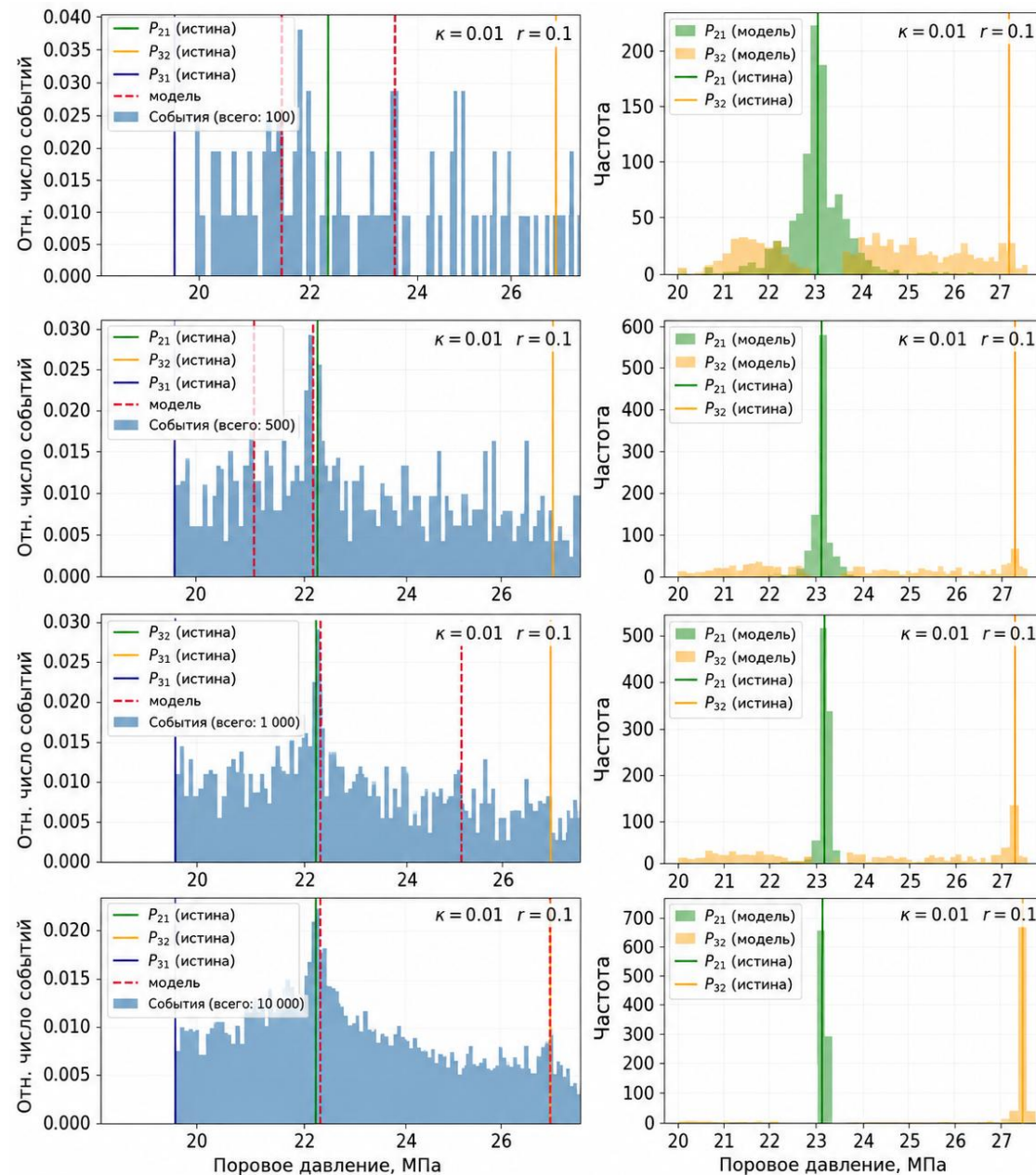
- Построена выборка синтетических кривых зависимости числа событий от порового давления для различного суммарного числа событий (от 100 до 50000) и различных величин параметров r и κ :

Варьируемые параметры модели		
Параметр кучности в распределении Фишера	κ	0.01, 0.1, 1, 5, 10, 25, 50
Коэффициент Лоде-Надаи	r	0.05, 0.1, 0.15, 0.2
Суммарное число событий	N_{events}	100, 500, 1000, 5000, 10000, 20000, 50000

- Реализована простая методика детектирования локальных максимумов на кривой «плотность событий – поровое давление» (P_{21} и P_{32} - давления «касания» кругов критерия Кулона).
- Вычислены и сопоставлены с истинными значения r и σ_2 , оценены ошибки восстановления по выборке из 1000 случайных кривых с заданными параметрами.

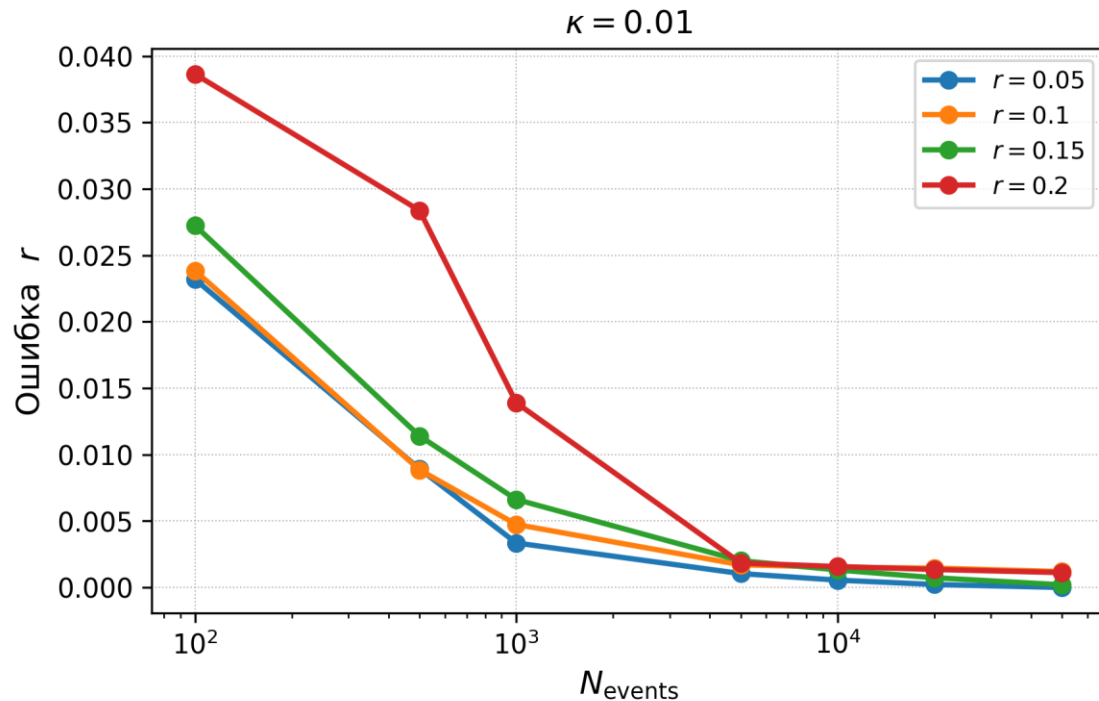
$$r = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\mu(P_{21} - P_{31})}{\mu(\sigma_1 - P_{31}) + C}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1(\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu) + 2\mu P_{21} - 2C}{(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)}$$

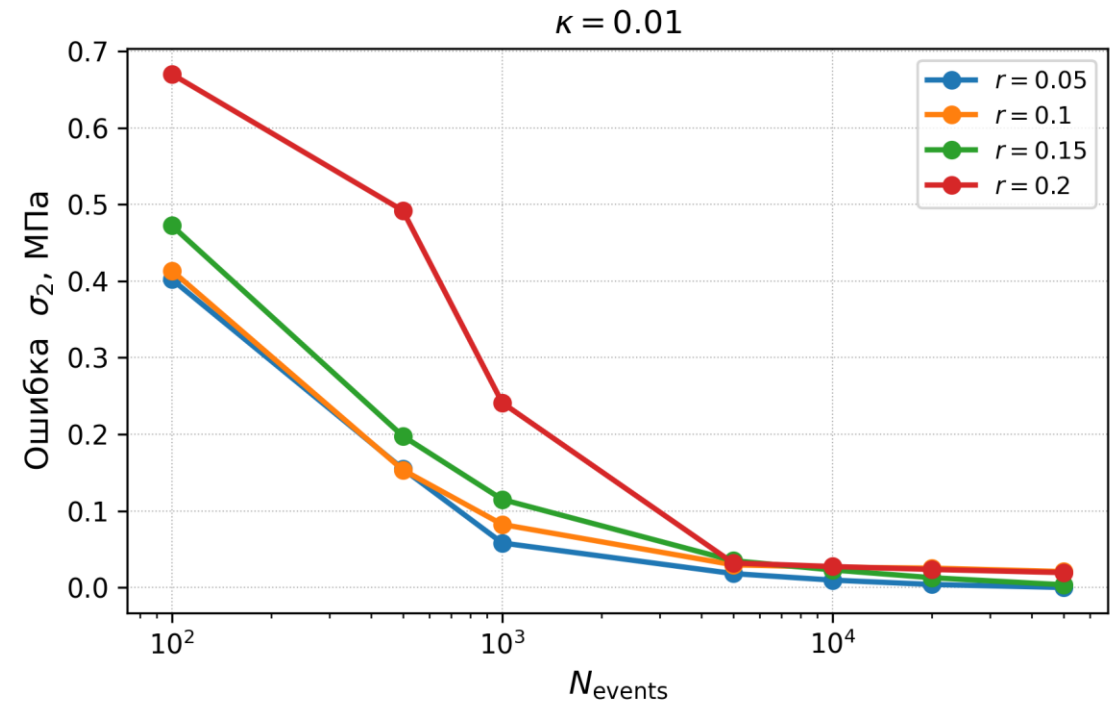


Результаты

Стандартная ошибка восстановления к-та Лодэ–Надаи



Стандартная ошибка восстановления σ_2



- Проведенное исследование показало возможность определения параметров напряжённого состояния по данным микросейсмичности
- Точность восстановления параметров определяется, с одной стороны, объёмом доступной микросейсмической информации, а с другой — «кучностью» ориентаций инициирующих трещин
- При близком к равномерному распределению нормалей плоскостей трещины и $N_{\text{events}} \geq 10^3$ предлагаемый метод позволяет получать оценки P_{21}, P_{32}, σ_2 с ошибкой ≤ 0.1 МПа, а коэффициента Лодэ–Надаи — с ошибкой ≤ 0.002

Статистическое моделирование динамики микросейсмических событий при росте порового давления для восстановления параметров напряжённого состояния пласта

Н.А. Барышников, С. Б. Турунтаев

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН

Спасибо за внимание!

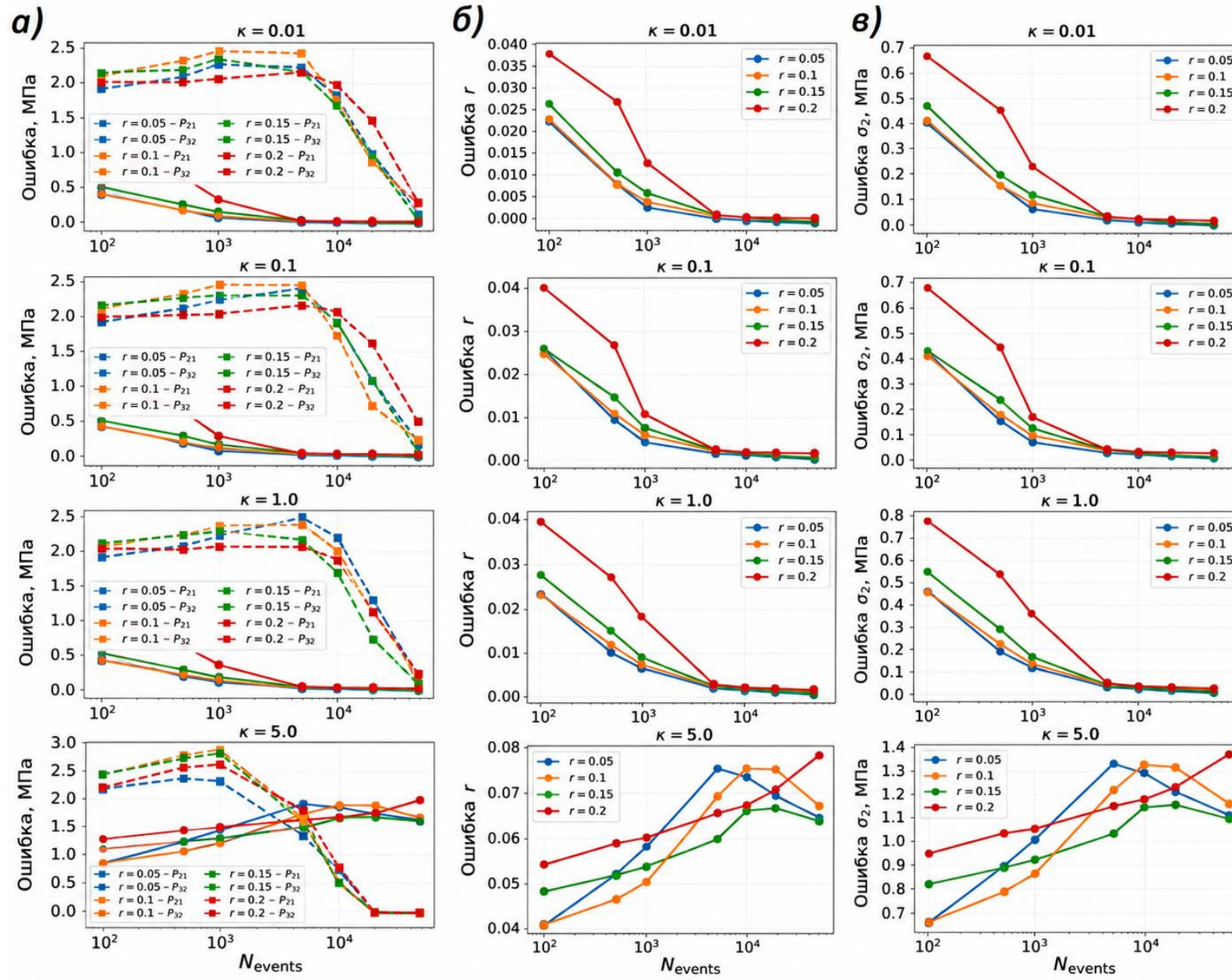
Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125012100531-7).

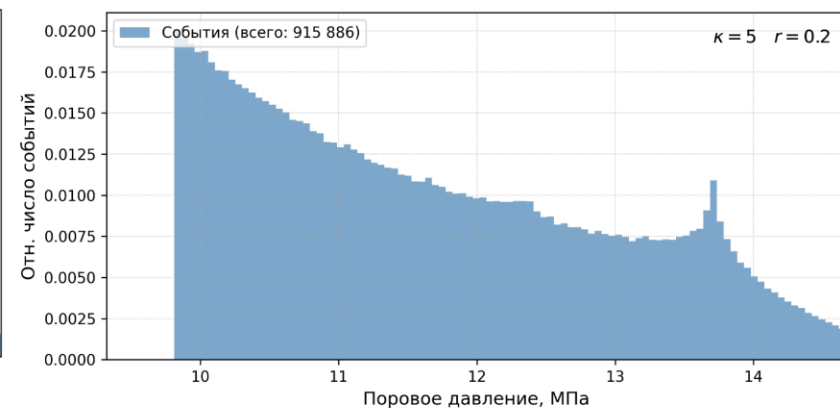
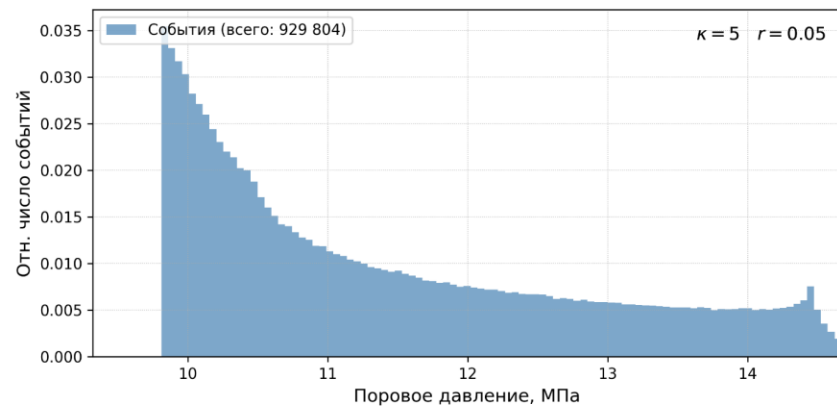
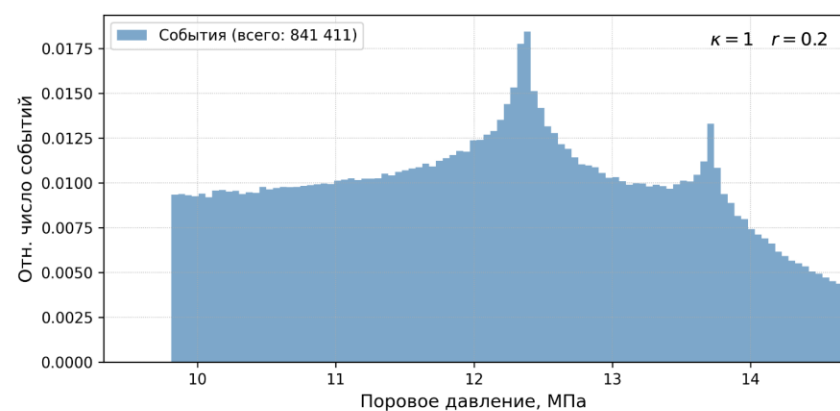
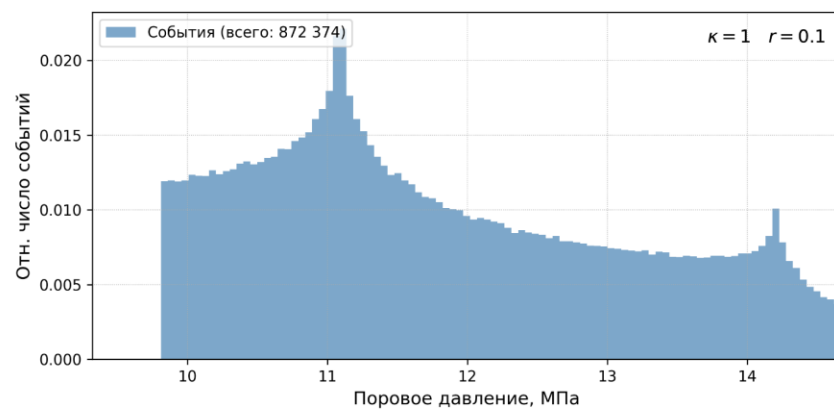
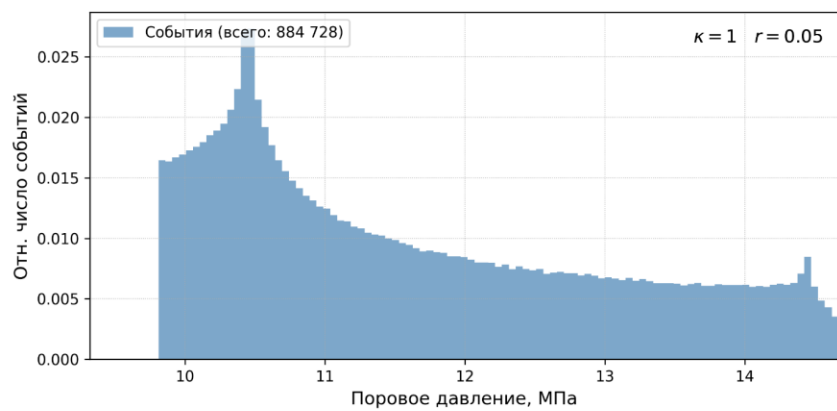
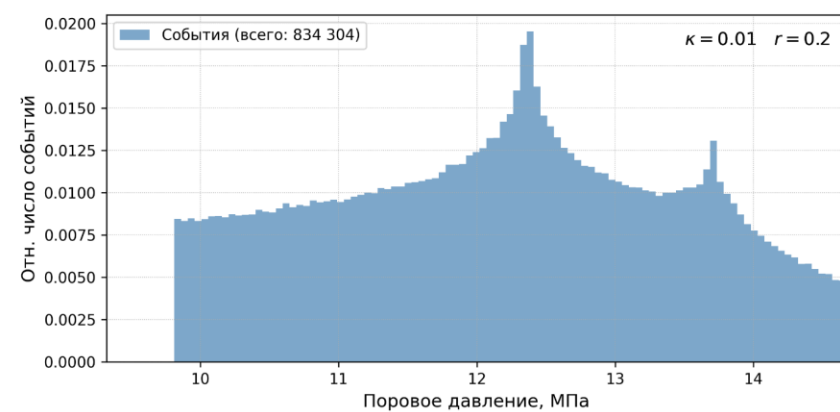
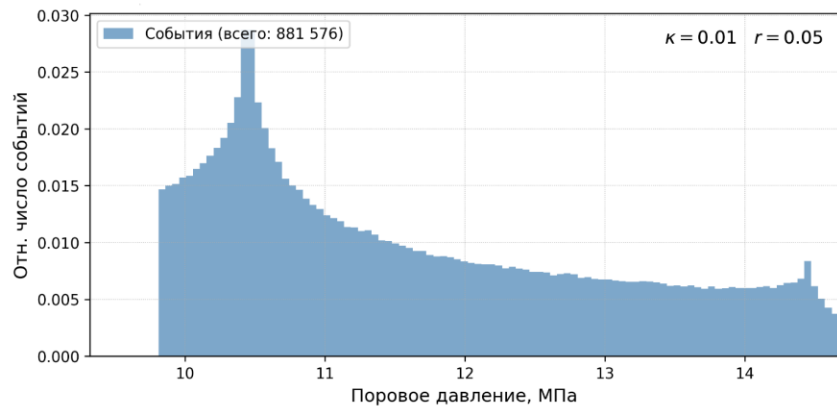
Вычислительные эксперименты выполнены на платформе Yandex DataSphere. Доступ к вычислительным ресурсам предоставлен в рамках гранта Программы поддержки курсов и исследований Центра технологий для общества Yandex Cloud

Yandex  **Cloud**

г. Коломна, 21.05.2026

Зависимость ошибок восстановления параметров напряжённого состояния пласта от общего числа модельных микросейсмических событий





Литература

Дубиня, Н. В. О методе решения обратной задачи восстановления напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным о естественной трещиноватости / Н. В. Дубиня, С. А. Тихоцкий // Физика Земли. – 2022. – № 4. – С. 113-134. – DOI 10.31857/S0002333722040020. – EDN ZRAMCQ.

Dichiarante A. M., Valoroso L., Improta L., Chiaraluce L., Buttinelli M., Bagh S., Wang T., Jordan P. D., Dreger D. S., Akerley J. Identifying geological structures through microseismic cluster and burst analyses during the 2011–2014 Illinois Basin–Decatur Project CO₂ injection // Elsevier Tectonophysics. 2021. Vol. 812. 229107. DOI: 10.1016/j.tecto.2021.229107.

Pakyuz-Charrier, E., Lindsay, M., Ogarko, V., Giraud, J., Jessell, M. Monte Carlo simulation for uncertainty estimation // Solid Earth. 2018. Vol. 9, no. 2. P. 385–402. DOI: 10.5194/se-9-385-2018.