



XI международная школа-семинар
«Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»
14-18 октября 2019 г.

Влияние геомеханических и флюидодинамических параметров на микросейсмичность при гидроразрыве пласта.

*^{1,2}Турунтаев С.Б., ¹Зенченко Е.В., ¹Тримонова М.А., ¹Зенченко П.Е.,
¹Барышников Н.А., ²А.А. Лукина
¹ИДГ РАН (Москва), ²МФТИ (Москва)*

Содержание

- Состояние проблемы связи ГРП и сейсмичности
- Моделирование ГРП
- Результаты
 - Давление гидроразрыва
 - Давление закрытия трещины ГРП
 - Взаимодействие трещин
 - АЭ при ГРП с использованием жидкости разной вязкости
- Выводы

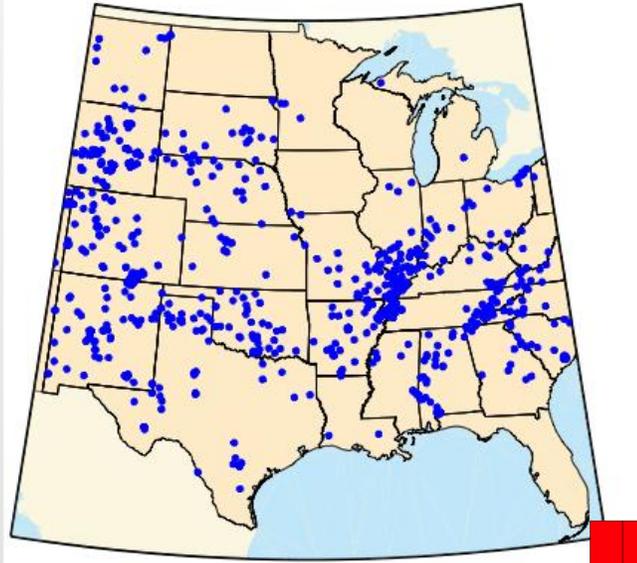
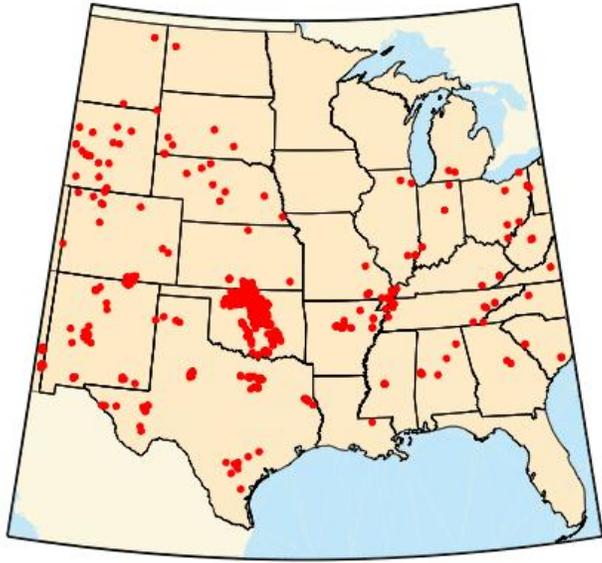
Состояние проблемы

- Гидравлический разрыв пласта, осуществляемый путем закачки жидкости в скважину под давлением, остается основным методом увеличения притока нефти к скважине.
- Нефтедобывающие и нефтесервисные компании при проведении гидроразрыва сталкиваются с проблемами, связанными с недостаточной проработанностью физических моделей.
- Развитие и усложнение моделей требует постановки лабораторных экспериментов, позволяющих оценить влияние тех или иных факторов на развитие трещин ГРП.
- Побочным эффектом проведения работ по ГРП является появление техногенных сейсмических событий.
- События малой магнитуды используются как основной индикатор положения и размеров трещин гидроразрыва.
- В ряде районов интенсивной разработки месторождений и массового применения ГРП отмечается многократное возрастание сейсмической активности и появление ощутимых землетрясений.

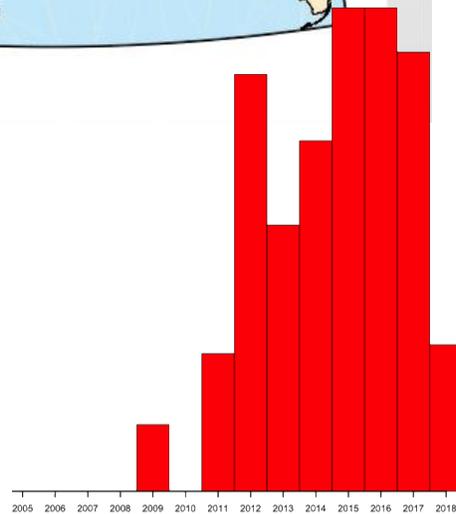
Усиление сейсмической активности при разработке сланцевых месторождений нефти, США

2009-2015 361 M \geq 3 /год

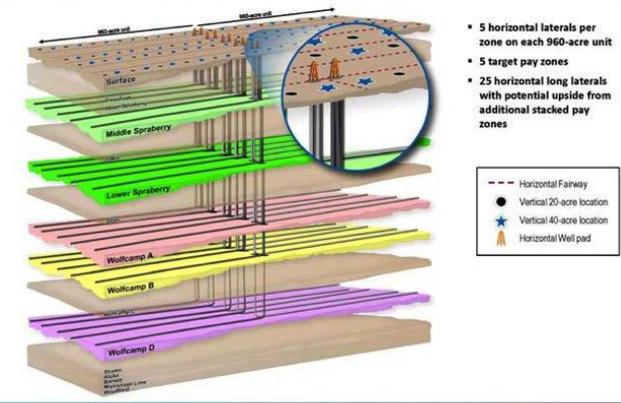
1973-2008 24 M \geq 3 /год

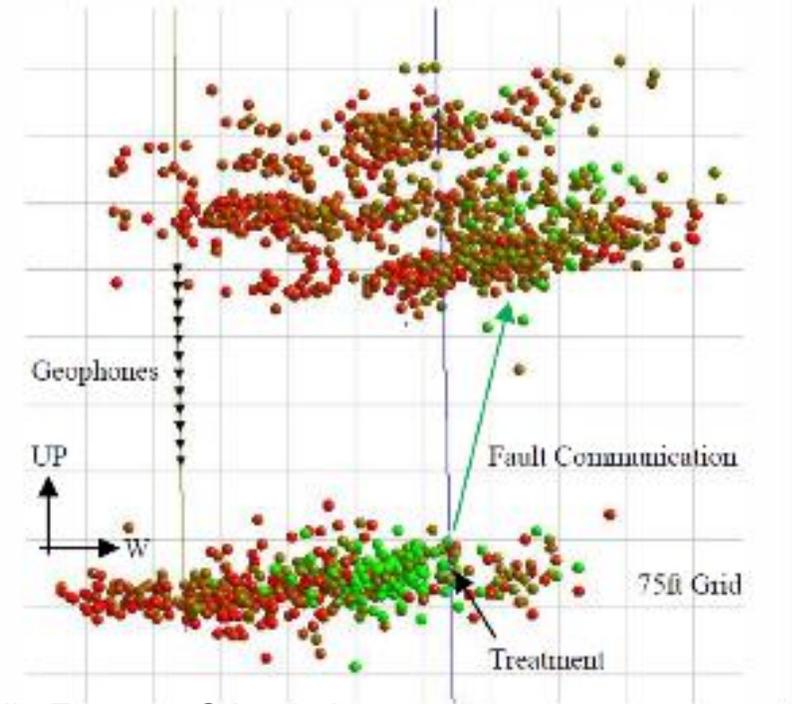
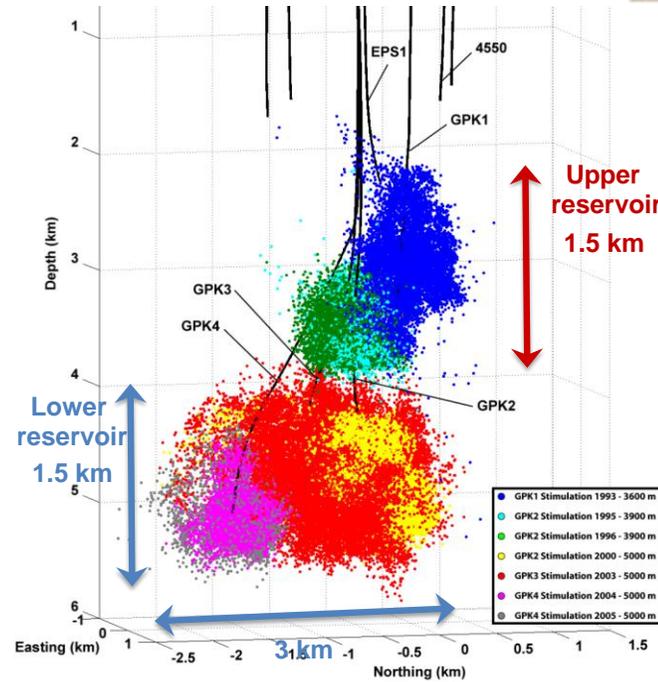
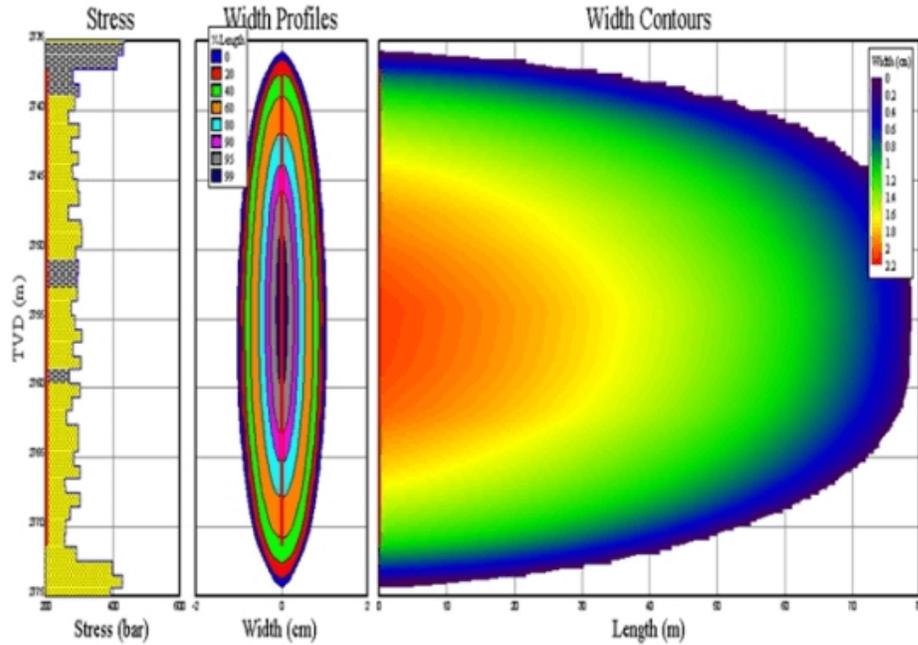
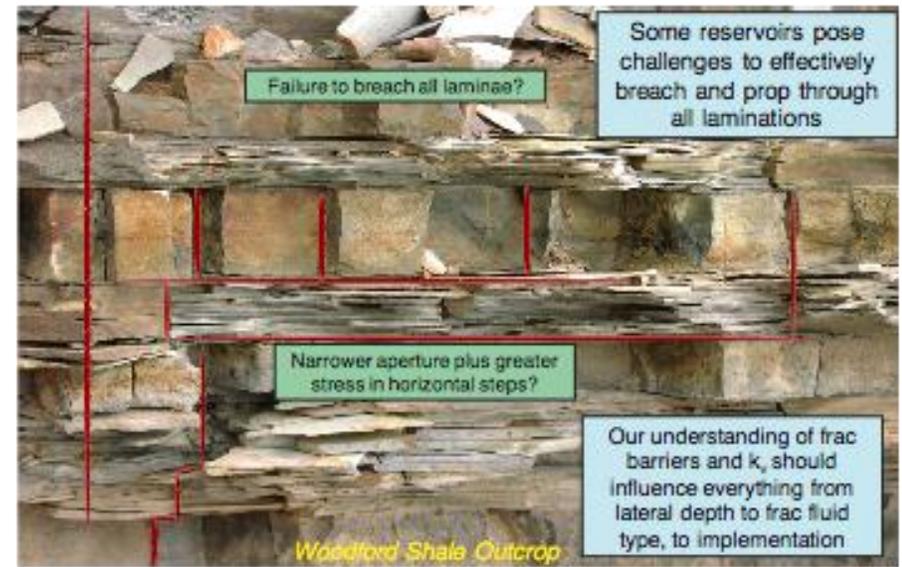
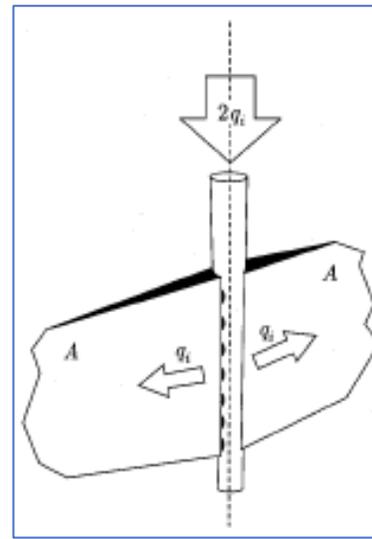
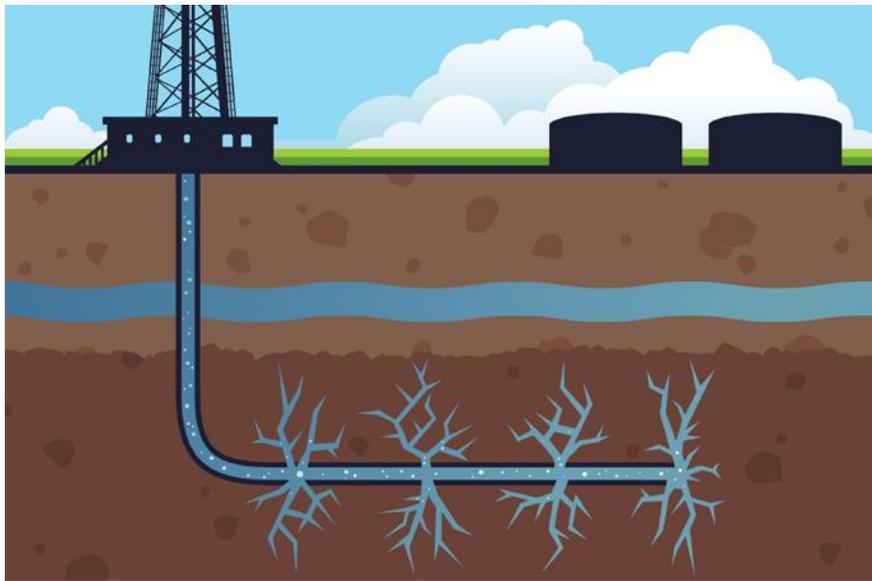


William L. Ellsworth et al.
Stanford Centre for Induced and Triggered Seismicity

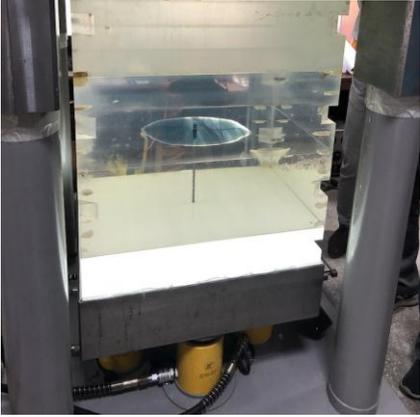


Development Scheme and Multi-Zone Well Pads





Microseismic Monitoring Developments in Hydraulic Fracture Stimulation
 Mirko van der Baan, David Eaton and Maurice Dusseault

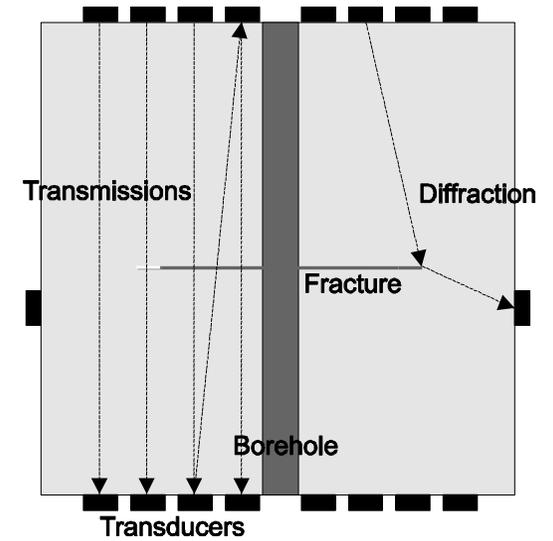


#3 - Marble

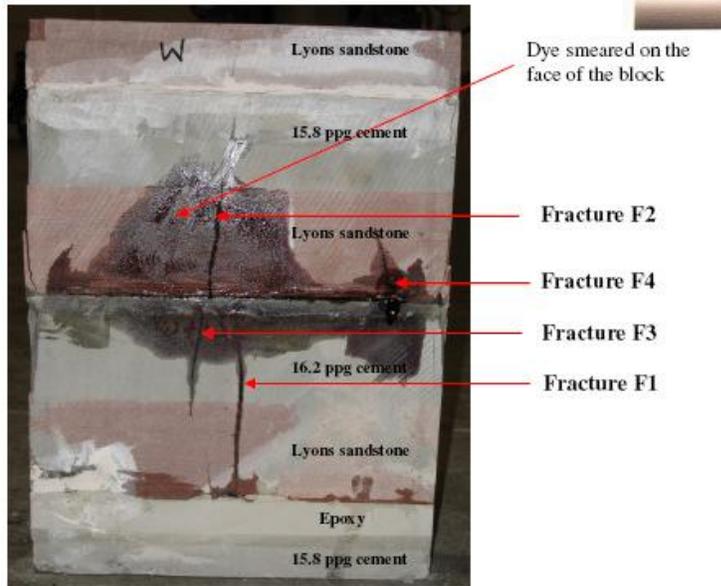
- Viscosity/lag dominated experiment
 - Silicon oil 45Pa.s @ 0.02mL/min
 - Stress 10-10-0 MPa
 - Problem at the notch/completion tool location resulted in a curved fracture

$t_{mk} = 176s.$
 $\psi \approx 0$

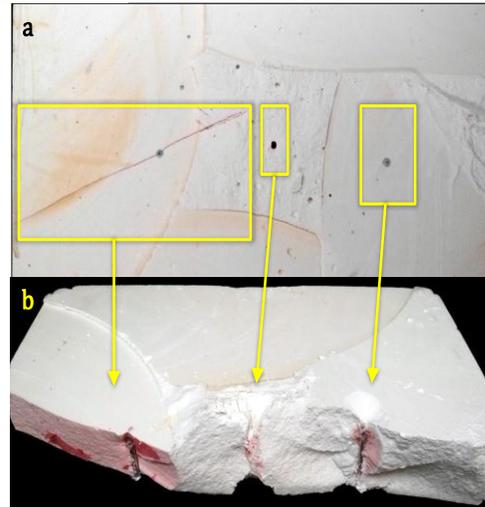
Теоретические модели
должны поверяться
лабораторными
экспериментами



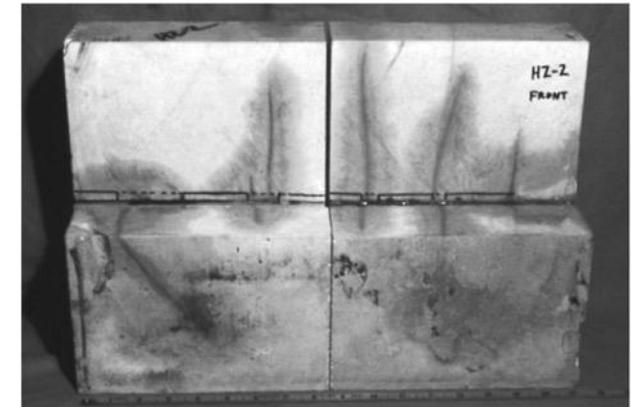
J. Groenenboom, D.B. van Dam,* SPE, and C.J. de Pater, SPE, Delft U. of Technology



Laboratory Hydraulic Fracturing Tests on Small Homogeneous and Laminated Blocks
Athavale, A.S., Miskimins, J.L. 2008, ARMA 08-067.



Experimental Investigation of Geomechanical Aspects of Hydraulic Fracturing Unconventional Formations by Emad Abbad Alabbad, MS Thesis The University of Texas at Austin, 2014



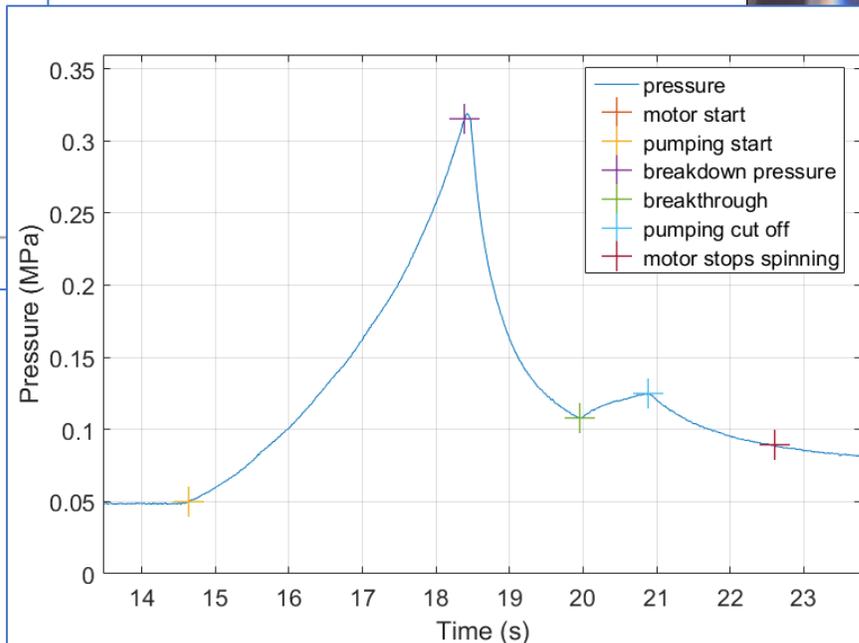
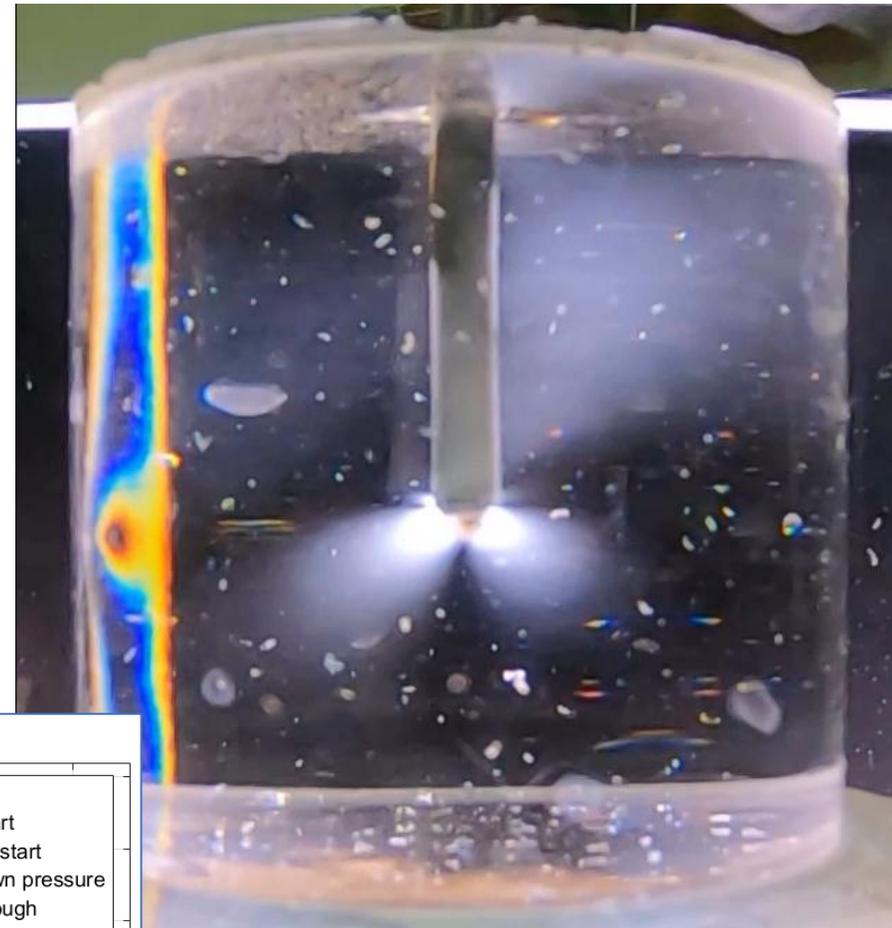
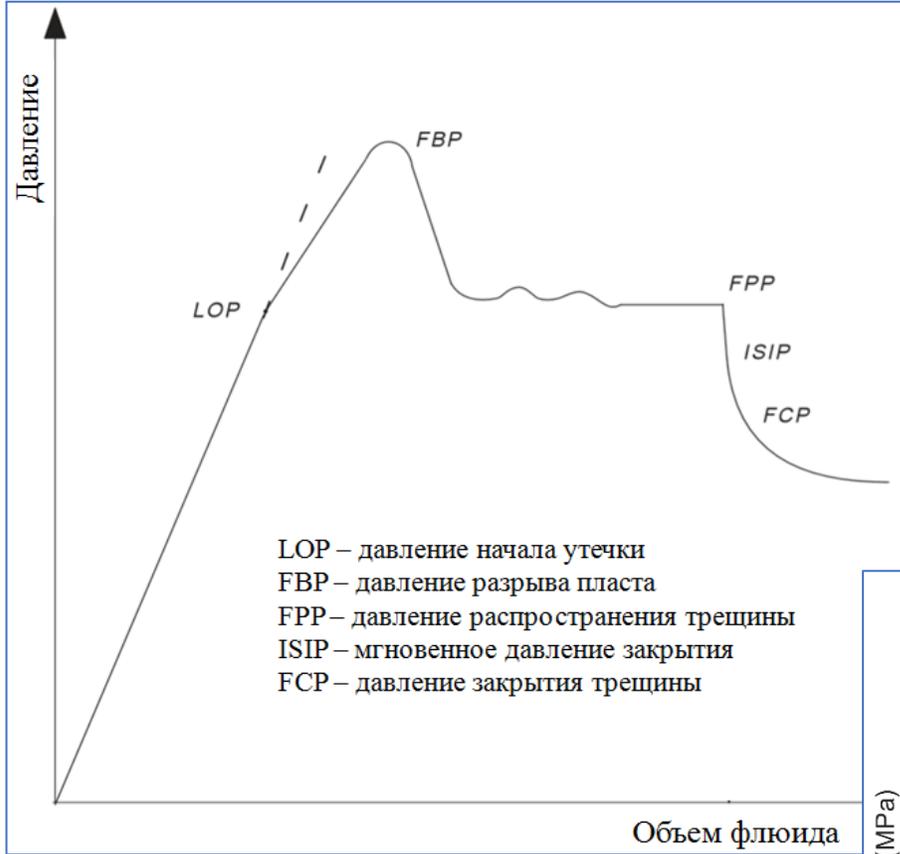
El Rabaa, W.: SPE 19720, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, Oct. 8-11, 1989

- Для прогнозирования геометрии существует большое количество моделей, различающихся постановкой задачи, количеством допущений и сложностью, начиная от классических аналитических моделей [Желтов, Христианович, 1955; Perkins, Kern, 1961; Geertsma, de Klerk, 1969] и заканчивая современными численными моделями [Adachi et al., 2007, Petunin, 2013; Savenkov, Borisov, 2018, Lecampion, 2018].
- Сложность моделирования распространения трещины ГРП обусловлена большим количеством параметров, характеризующих жидкость разрыва и породу, а также необходимостью одновременного рассмотрения гидродинамических и геомеханических процессов.

Решаемые задачи

1. Исследовать условия возникновения и распространения трещины гидроразрыва;
2. Измерить скорость распространения трещины;
3. Исследовать образование трещины повторного гидроразрыва при изменении напряженно-деформированного состояния;
4. Измерить скорость распространения фронта жидкости в трещине;
5. Исследовать повторное открытие трещины ГРП;
6. Определить положение источников акустической эмиссии при распространении трещины ГРП.

Характерные параметры кривой давления на забое скважины при ГРП

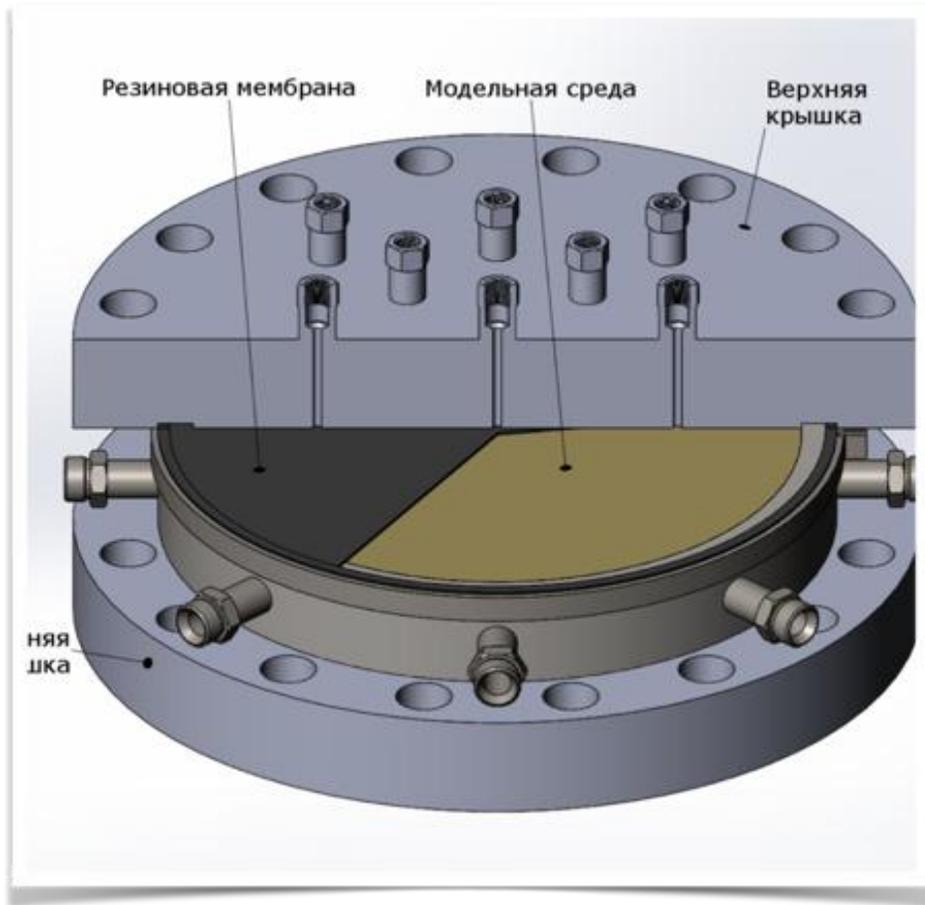


$$FBP = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + \sigma_p, \quad (1)$$

$$FPP = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max}, \quad (2)$$

$$FCP = \sigma_{\min}, \quad (3)$$

Лабораторная установка ИДГ РАН для проведения экспериментов по ГРП с возможностью задавать постоянный расход или давление в скважине, задавать горизонтальные и вертикальные напряжения, контраст горизонтальных напряжений, регистрировать поровое давление, микросейсмическую (акустическую) эмиссию



■ Создаваемые нагрузки:

- вертикальное напряжение до 120 атм;
- горизонтальные напряжения по двум осям до 80 атм;
- поровое давление до 110 атм.

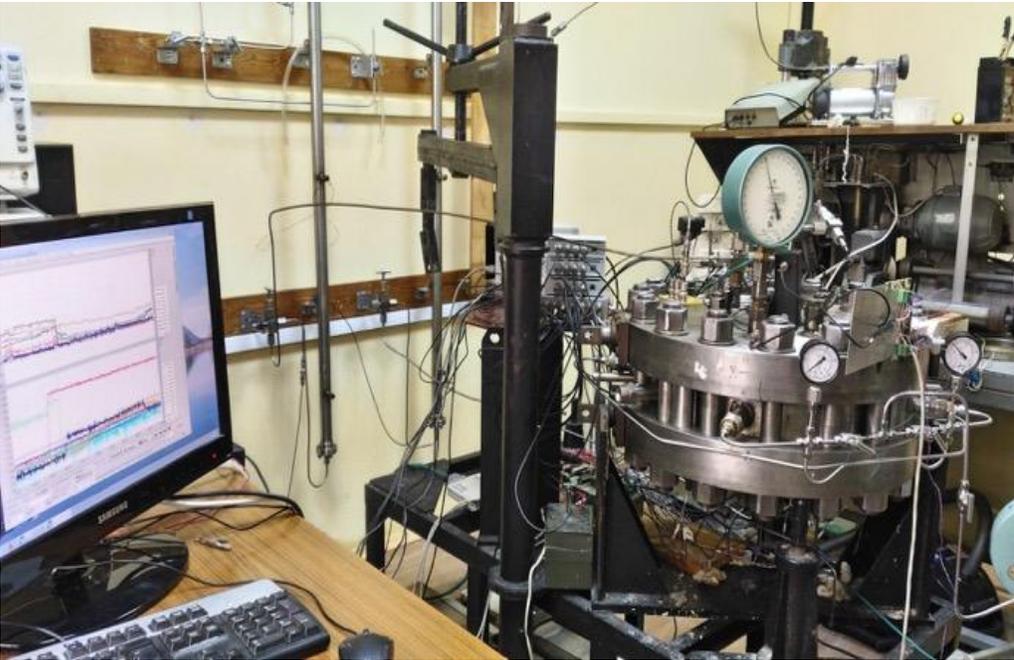
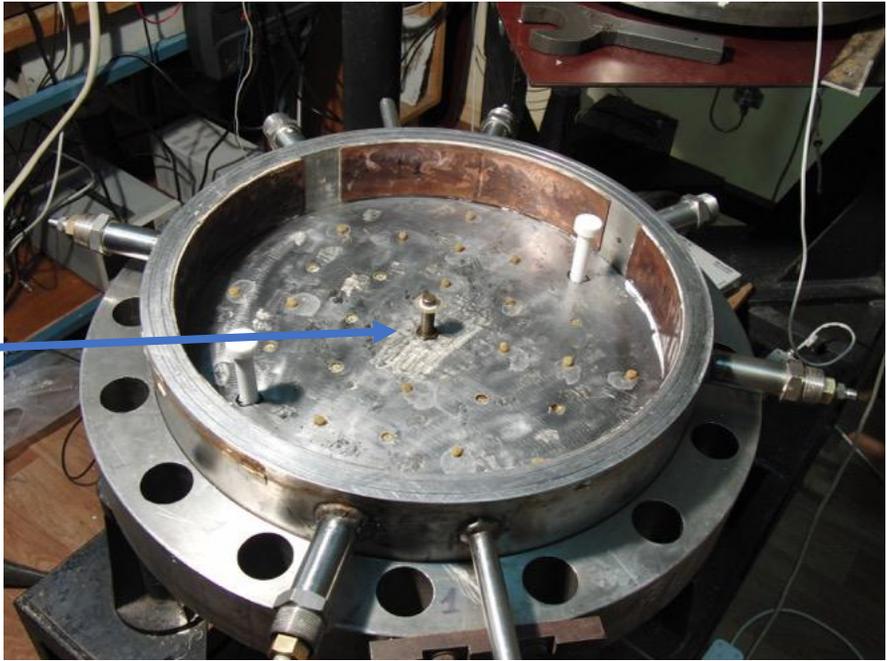
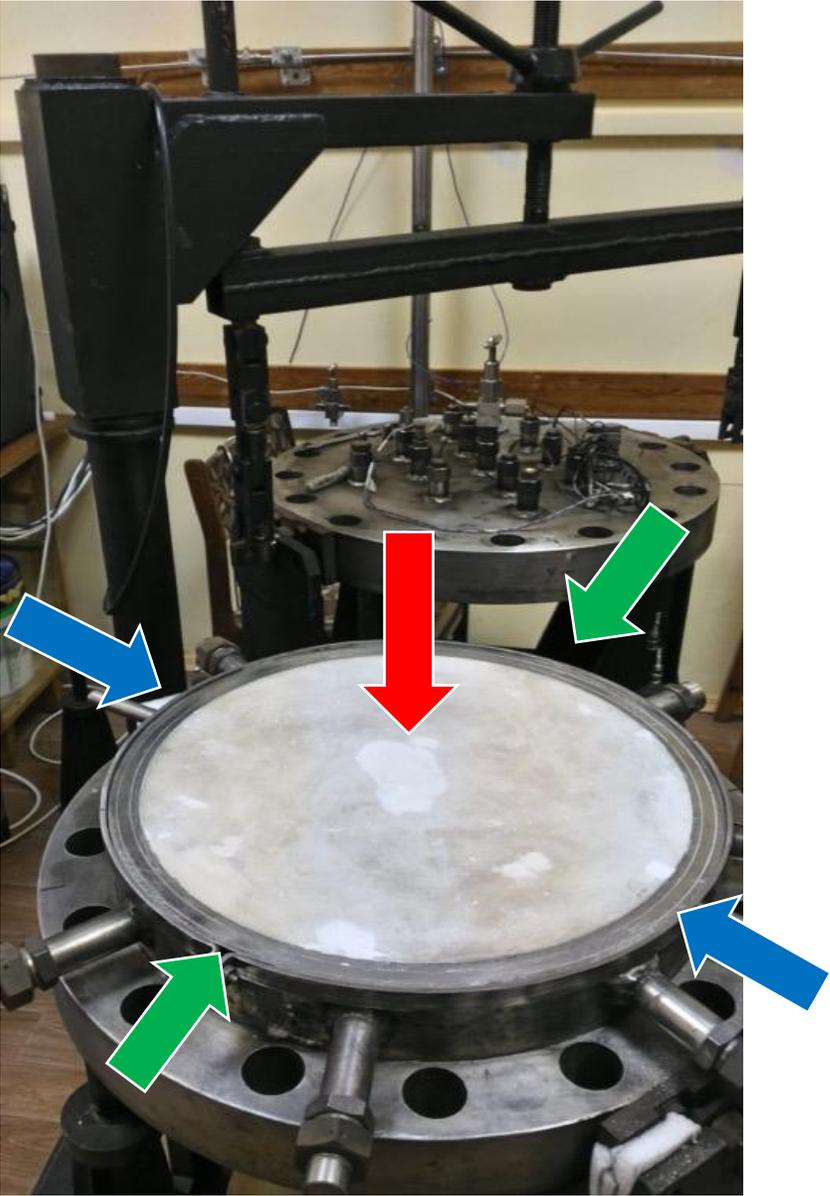
■ Параметры закачки жидкости:

- при постоянном давлении (до 110 атм)
- при постоянном расходе (до 0.3 см³/сек)
- при постоянном перепаде давления (до 80 атм между точками закачки и стока)

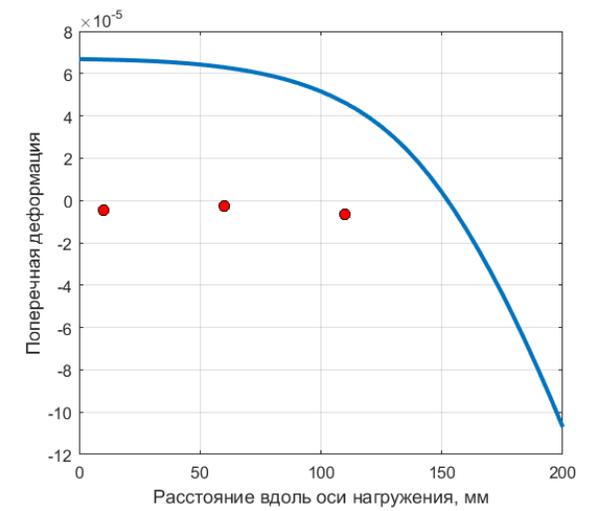
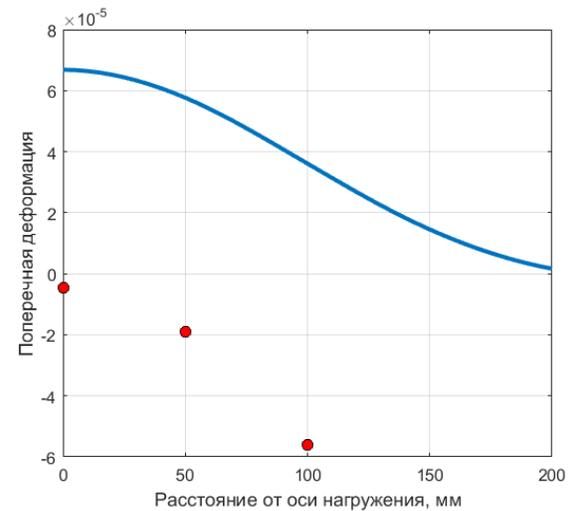
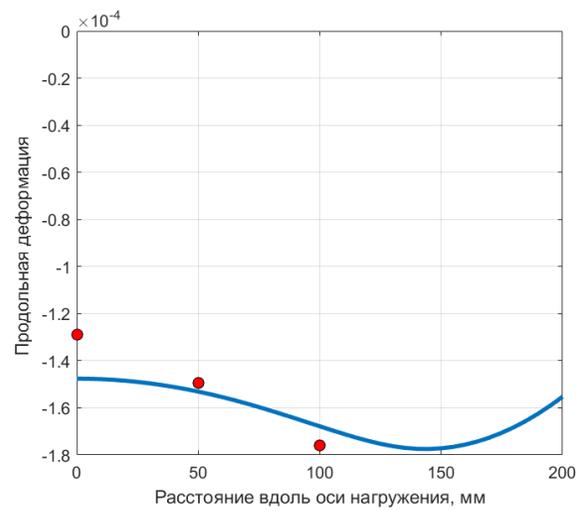
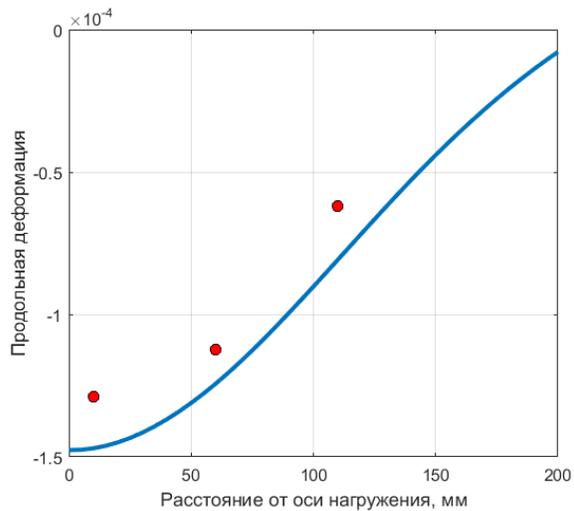
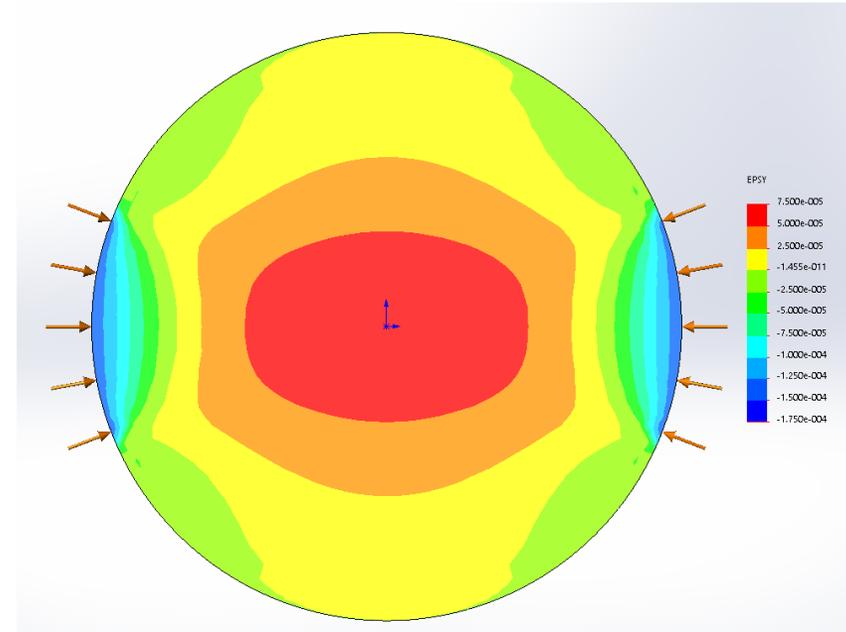
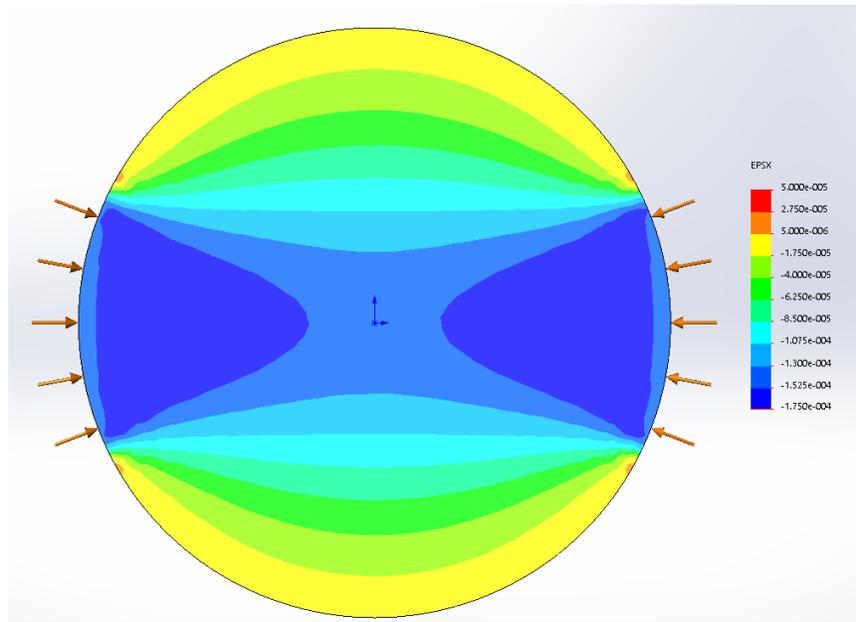
■ Регистрируемые величины:

- расход и давление вытекающей из образца и закачиваемой в образец жидкости; поровое давление (до 15 точек измерения); импульсы акустической эмиссии в 15 фиксированных точках (определение положения источников сигнала с точностью 5 мм); интервальное время пробега продольной волны.

Экспериментальная установка



НАГРУЖЕНИЕ ПО ОСИ X 2МПА



Расчеты и измерения напряженно-деформированного состояния

- В качестве модельного материала использовался гипс с цементом в соотношении 9:1, к смеси добавлялось 45% воды
- Пористость 40-50%
- Проницаемость 1 - 2.7 мД

Образец насыщался раствором гипса в воде. В качестве жидкости гидроразрыва использовалось минеральное вакуумное масло (вязкость 112 сПуаз, плотность 0,86г/см³)

Подобие: безразмерные параметры

| Содержание (цемент/гипс) | 1/8 | 1/8 | 1/8 + сил.клей | 1/8 + сил.клей | 1/10 | 1/10 |
|-----------------------------|------|------|-------------------|-------------------|------|------|
| Проницаемость (мДарси) | 23.3 | 23.6 | 24.9 | 24.4 | 17.8 | 17.9 |

$$\sigma_{UCS} = 6.4 \pm 0.93 MPa \quad \sigma_{TSTR} = 0.8 \pm 0.18 MPa$$

| | Bulk density, g/sm ³ | P-wave velocity in massif, m/s | Rod p-wave velocity, m/s | Young's Modulus, GPa | Poisson's Ratio |
|---------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|
| Dynamic | 1.77 | 2310 | 2100 | 7.7 | 0.26 |
| Static | 1.77 | 2260 | - | 3.6 | 0.21 |

время $N_t = \frac{ti}{r_w^3}$,

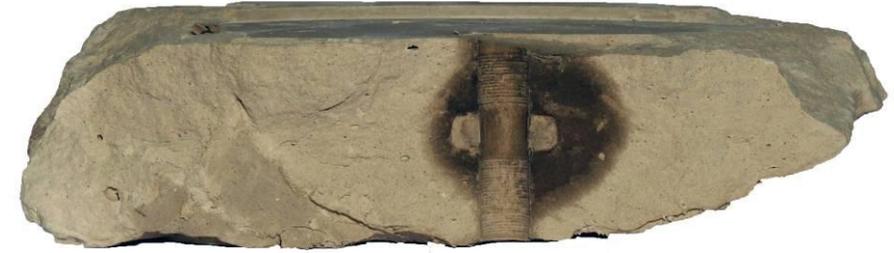
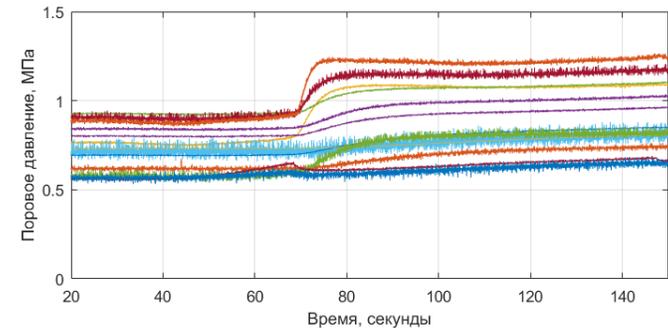
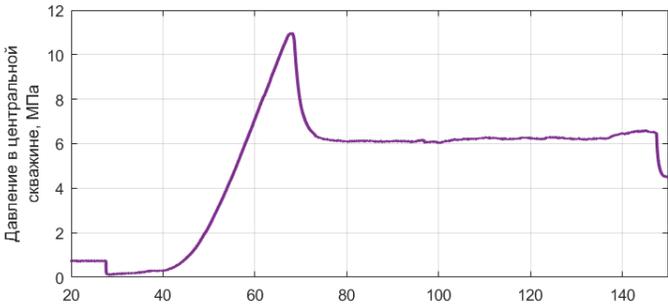
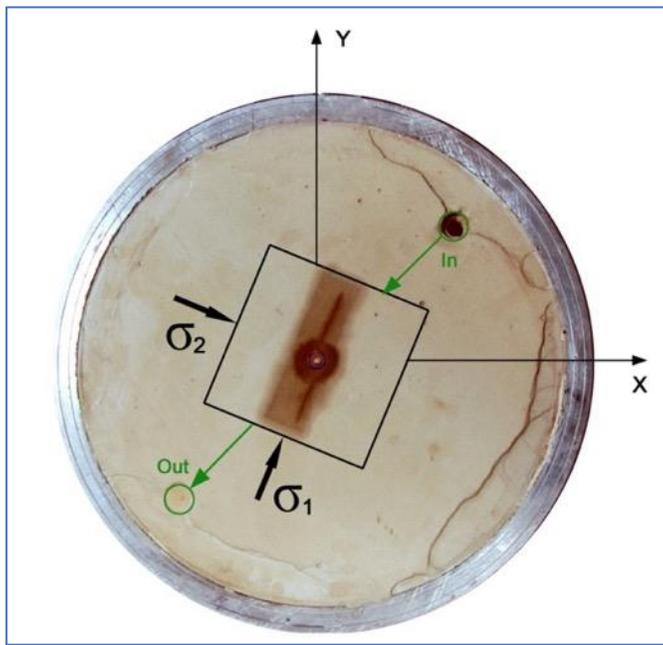
проницаемость $N_{\bar{E}} = \frac{\bar{E}r_w^3}{\bar{\mu}i}$,

утечки $N_{K_l} = K_l \sqrt{\frac{r_w}{i}}$,

напряжения $N_{\sigma} = \frac{\sigma}{\bar{E}}$,

трещиностойкость $N_{K_1} = \frac{K_{1c}^2}{4r_w \bar{E}^2}$,

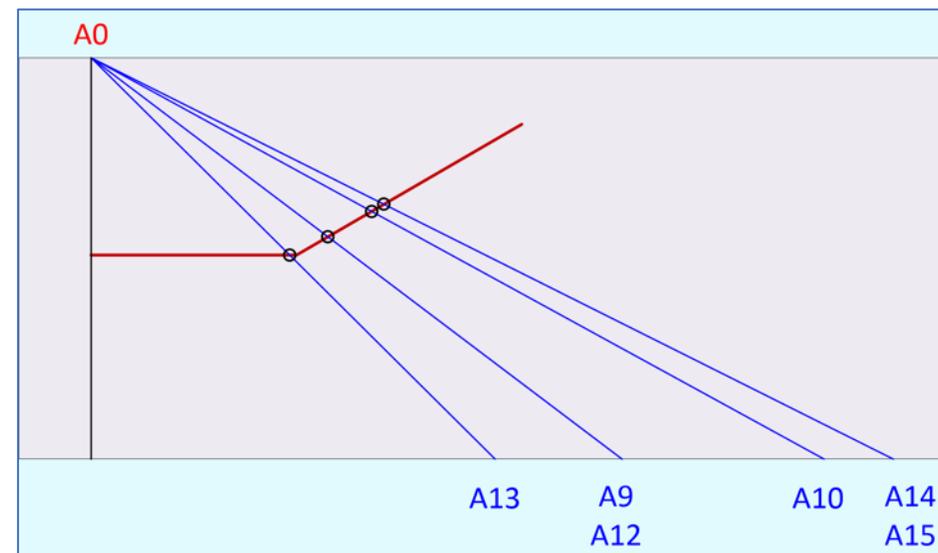
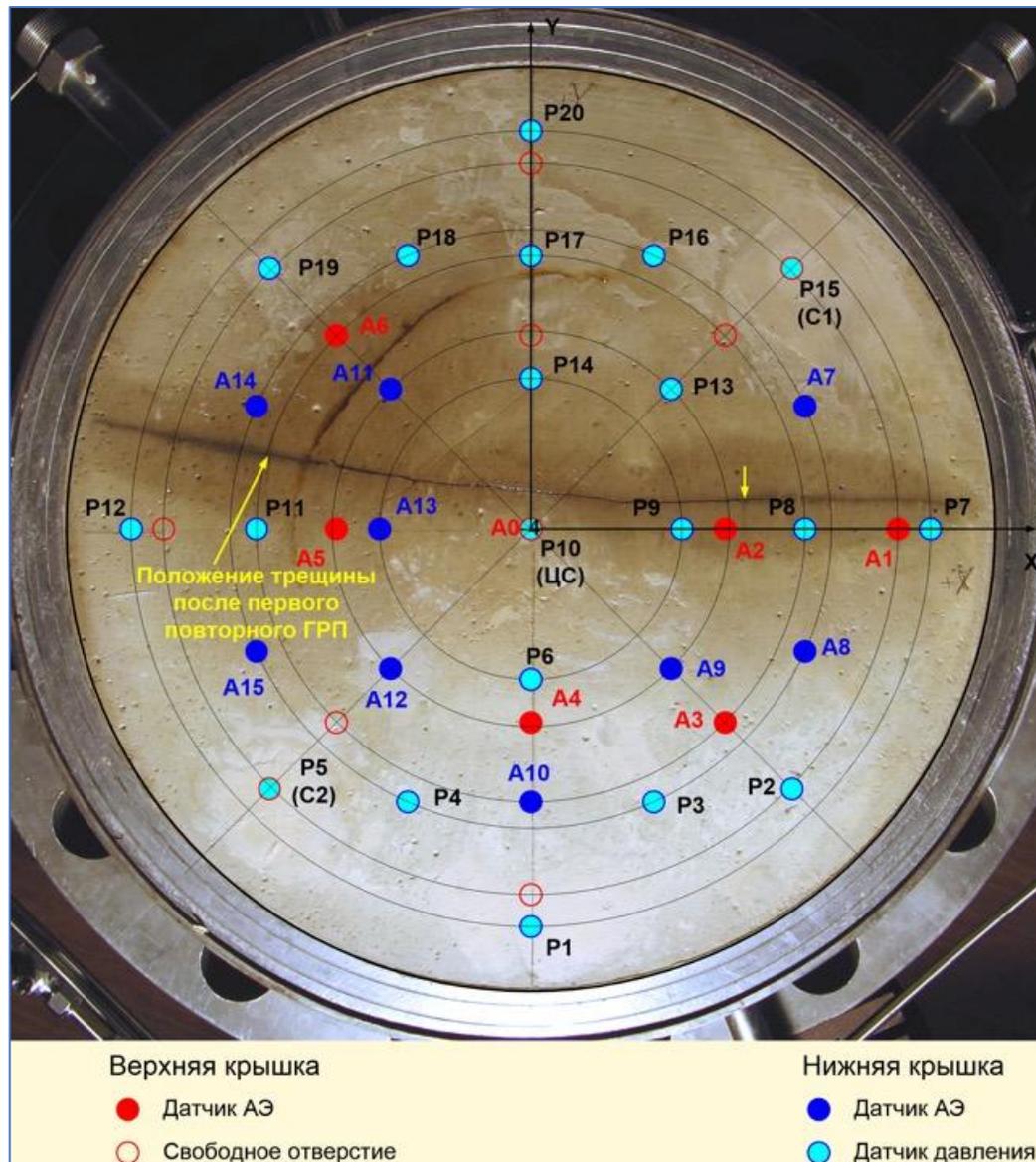
контраст напряжений $N_{\lambda} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$



$$\sigma_{TSTR} = 0.8 \pm 0.18 \text{ MPa} \quad \text{FBP} \gg 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + \sigma_p, \text{ FPP} \gg 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max}, \text{ FCP} \gg \sigma_{\min}$$

- Вертикальное давление, Мпа 7,1
- Минимальное горизонтальное напряжение, Мпа 0,55
- Максимальное горизонтальное напряжение, Мпа 1,0
- Давление в нагнетательной скважине, Мпа 1,0
- Расход масла в центральной скважине, см³/с 0,37
- Угол между направлением максимального напряжения и осью скважин, градусы 22,5

Измерения динамики образования трещины



Схематический рисунок трещины после первого ГРП (красная линия). Синие отрезки соединяют излучатель А0 и используемые приёмники в нижней крышке.

Фото образца после первого и двух повторных ГРП с наложением схемы расположения акустических пьезопреобразователей и точек измерения порового давления

Создание горизонтальной трещины ГРП

Образовавшаяся трещина имела дисковый горизонтальный участок радиусом 36 мм, затем отклонилась от горизонтального распространения и вышла на верхнюю поверхность образца.

Был выполнен ряд экспериментов по нагнетанию жидкости и сбросу давления при разных значениях вертикальных напряжений в диапазоне 0,5...2,5 МПа

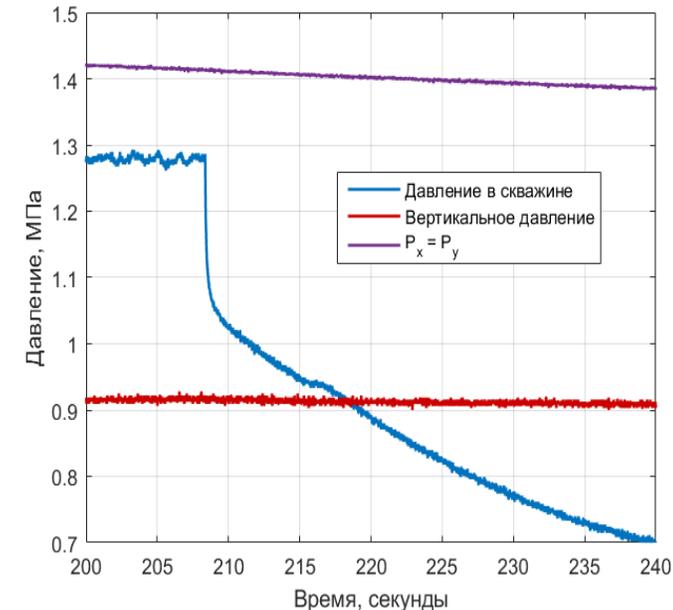
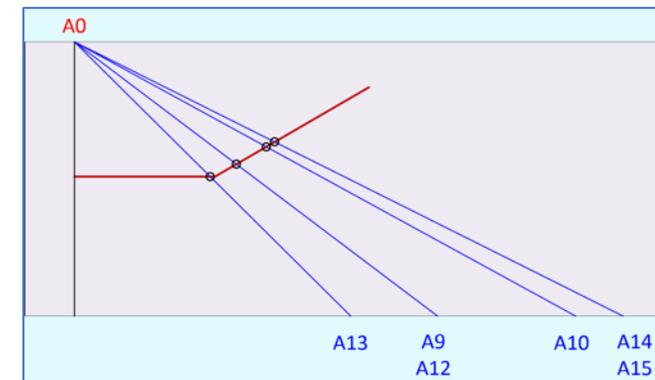
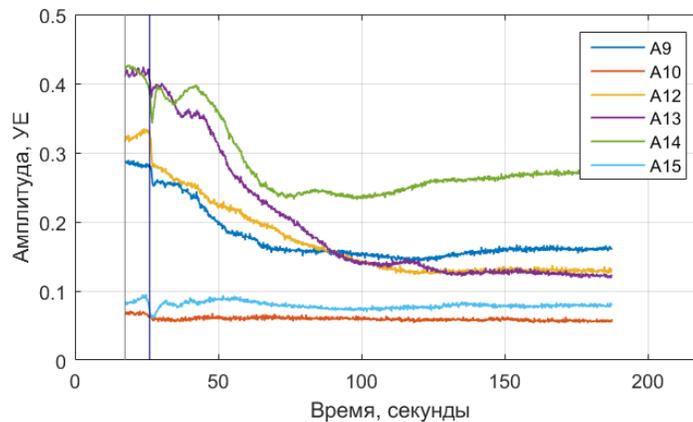
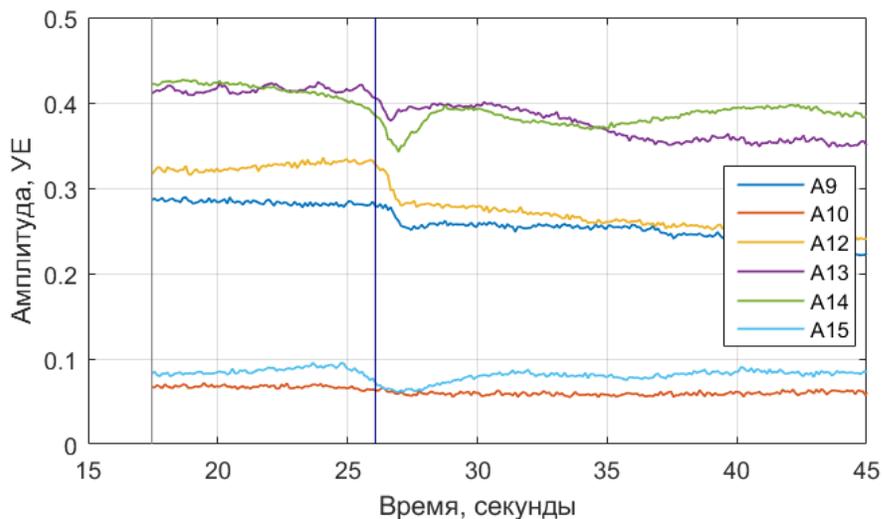
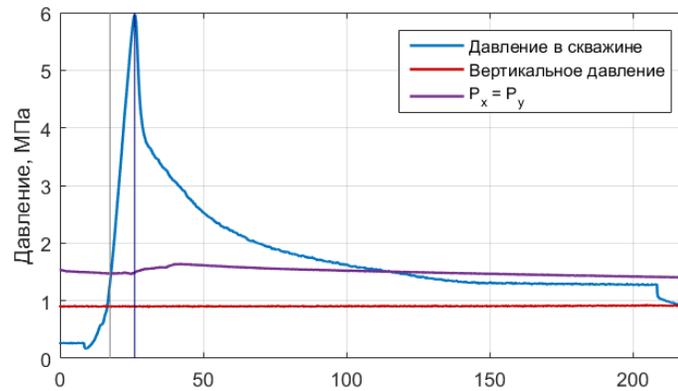
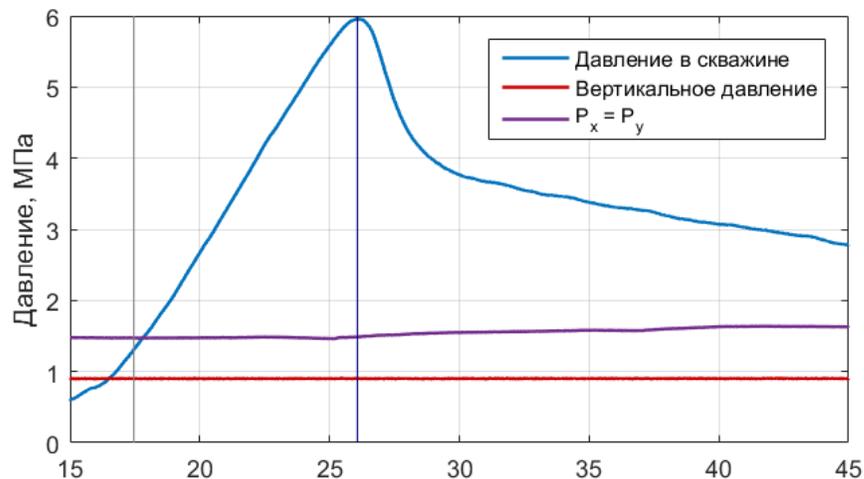


Создание вторичной вертикальной трещины ГРП

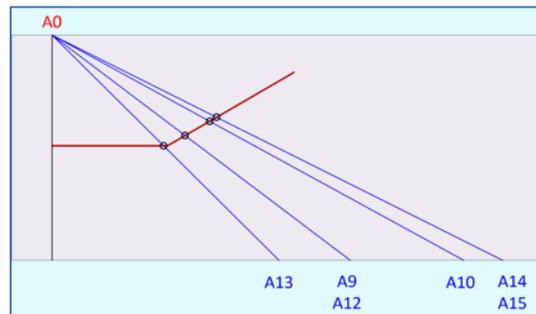
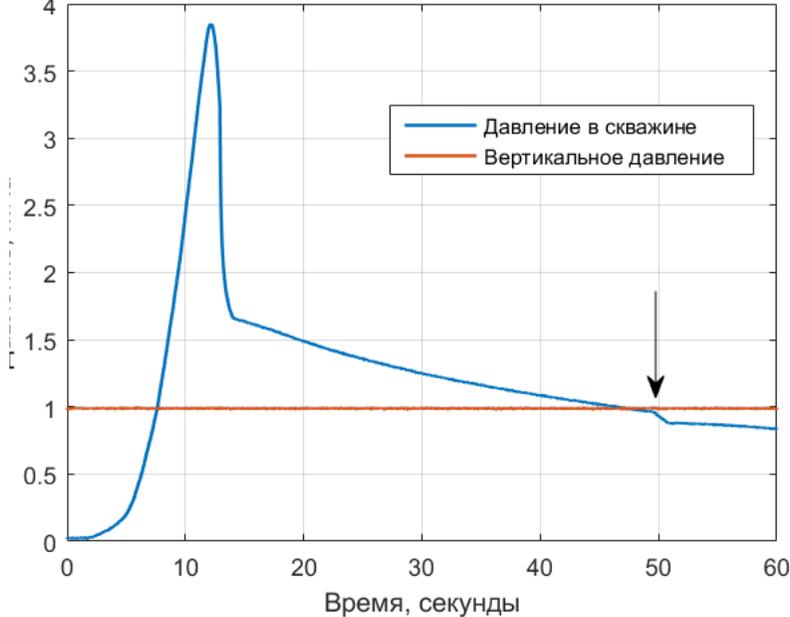
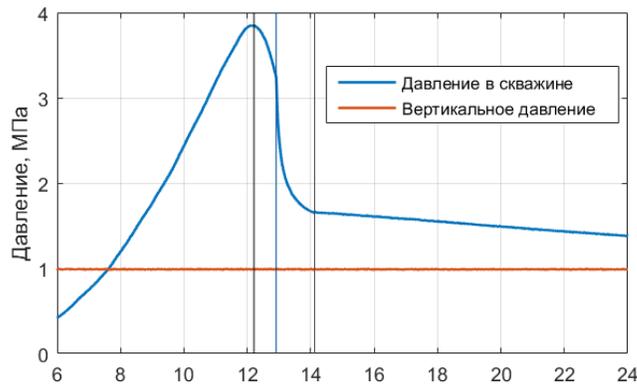
- Серия экспериментов на том же образце, в которых вертикальное напряжение значительно превышало горизонтальные (6,9 МПа – вертикальное, 3,2 МПа и 0,95 МПа – горизонтальные).
- Образовалась вертикальная трещина, которая пересекла прежнюю горизонтальную.



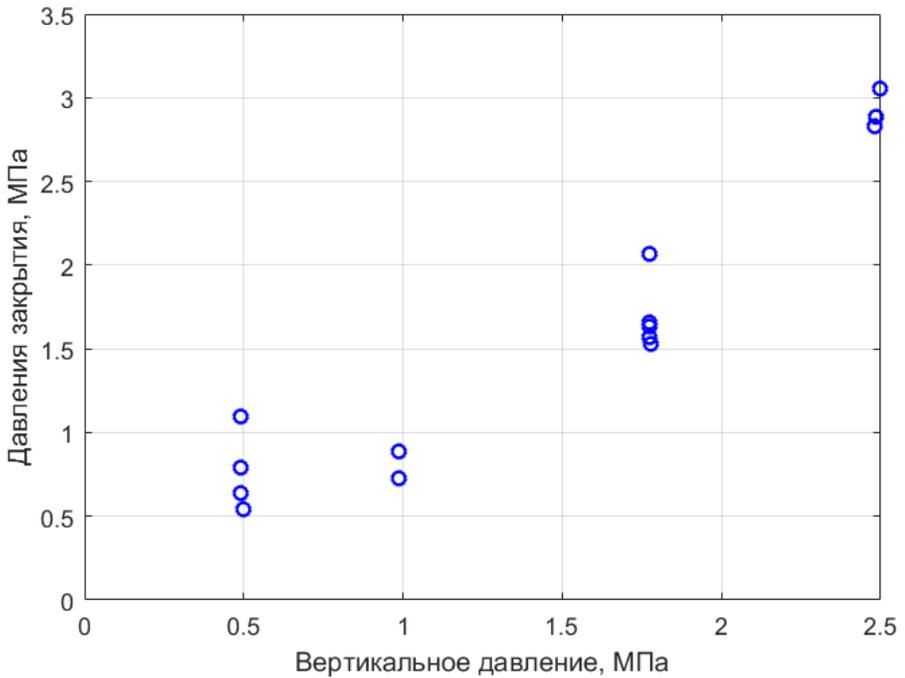
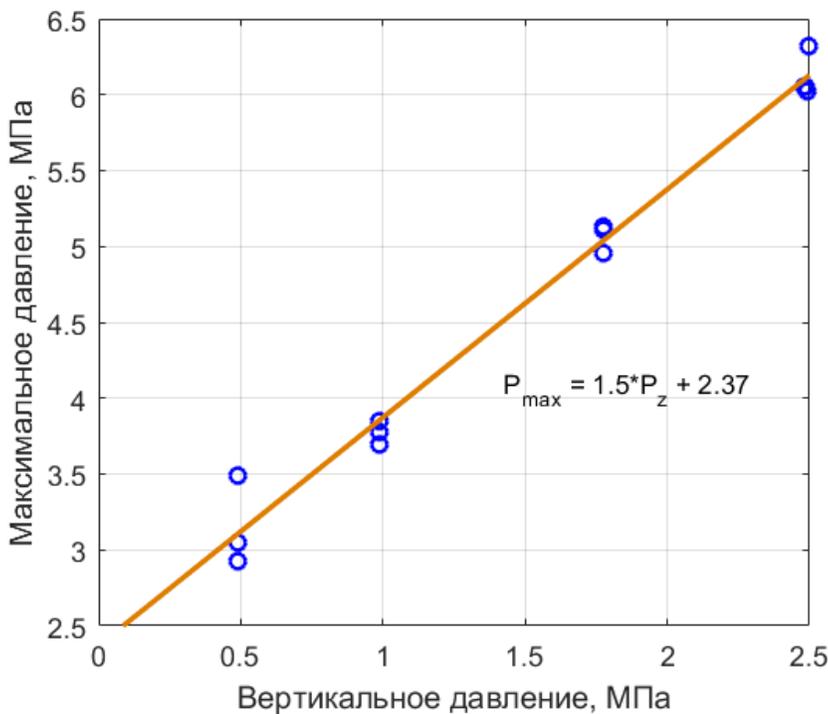
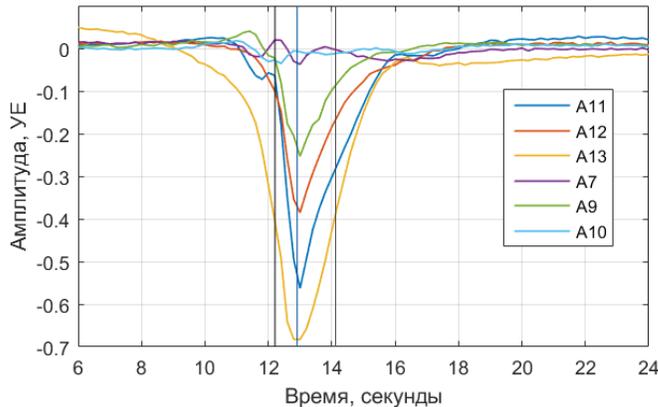
Результаты ГРП1: давление в скважине и изменение амплитуды проходящих волн



Рост амплитуды после начального падения связан с заполнением трещины жидкостью, как отмечено в работе: (Medlin W.L., Masse L. Laboratory Experiments in Fracture Propagation. SPE. June 1984. PP 256-268). Скорость заполнения трещины примерно 35 мм/с

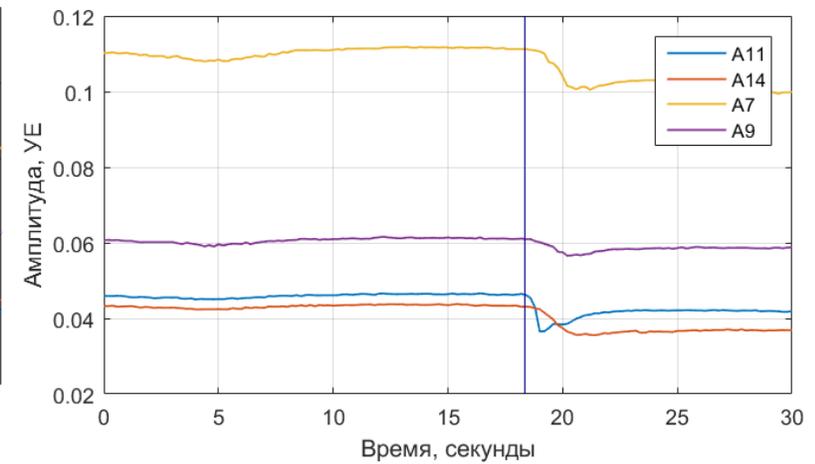
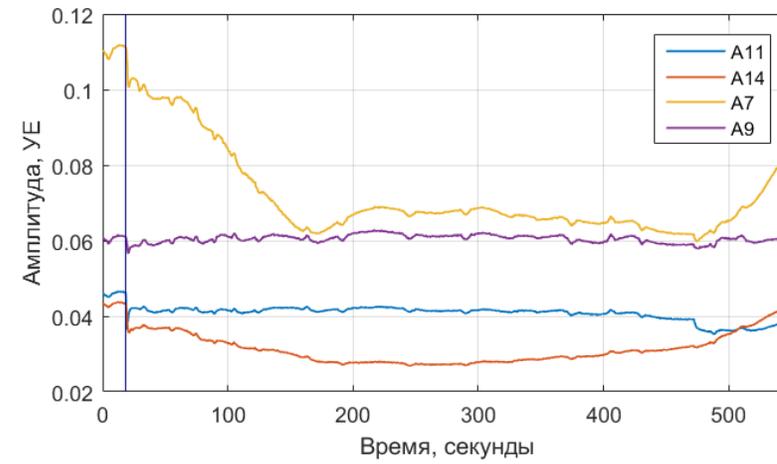
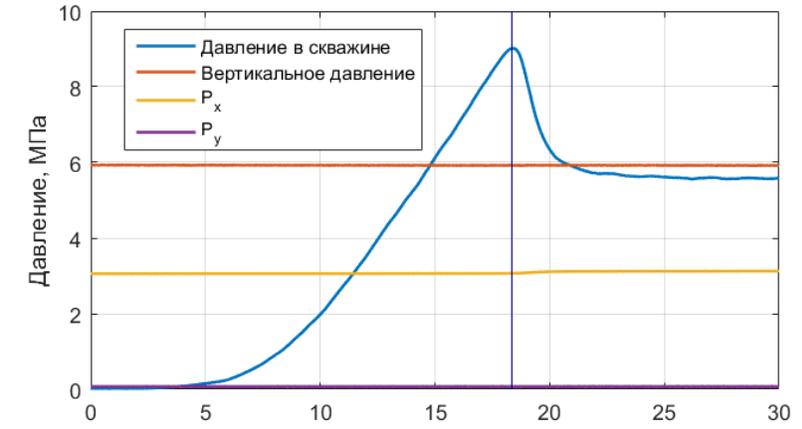
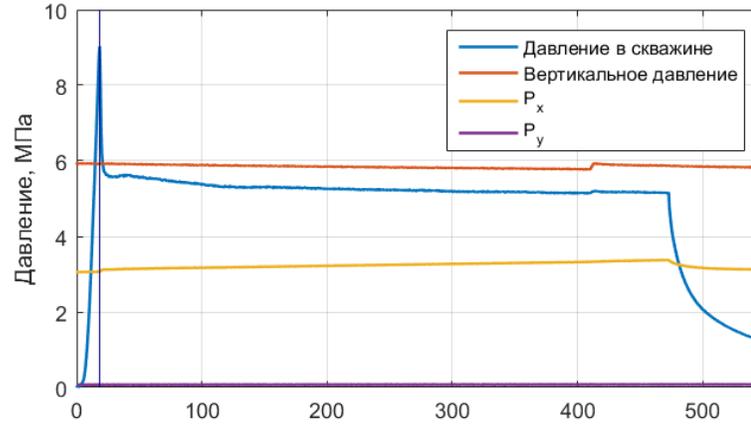
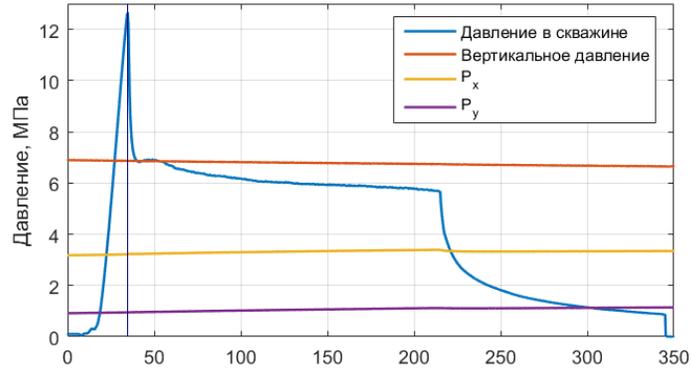


Повторное открытие трещины ГРП1 при разных вертикальных нагрузках



Закачка в трещину ГРП при вертикальном давлении 1 МПа. Давление в боковых камерах 0,2 МПа. После достижения пикового давления нагнетание останавливалось.

Результаты ГРП2 и ГРП3: создание и рост вертикальной трещины



Вертикальное давление – 6,8 МПа

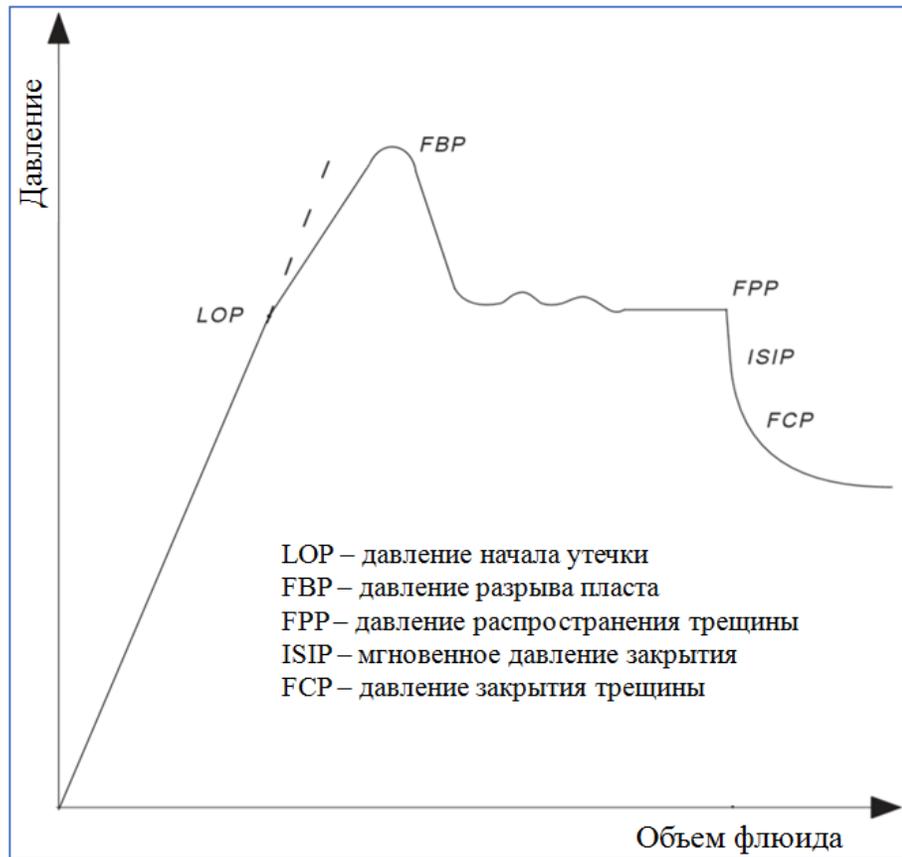
Давление в камере по оси X – 3,2 МПа

Давление в камере по оси Y – 1 МПа

Максимальное давление в скважине – 12,5 МПа

Трещина ГРП прошла приблизительно в направлении максимального горизонтального сжимающего напряжения

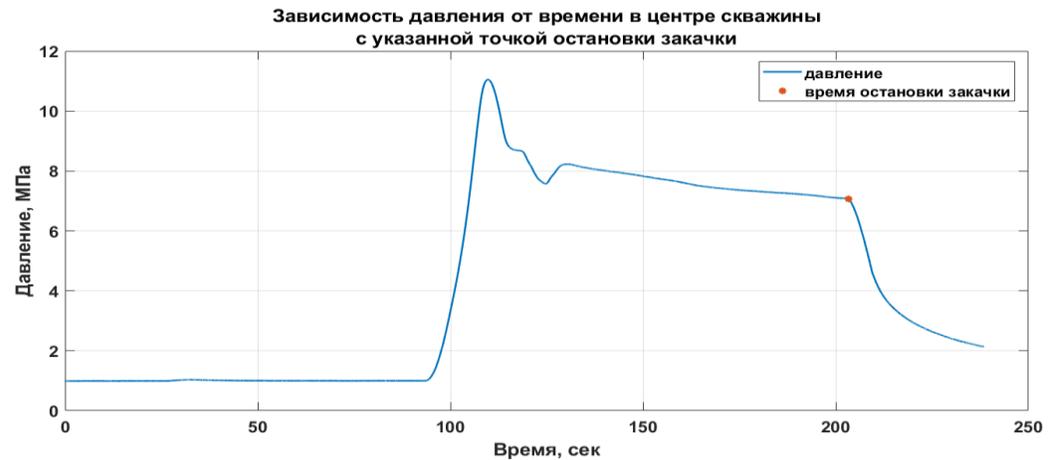
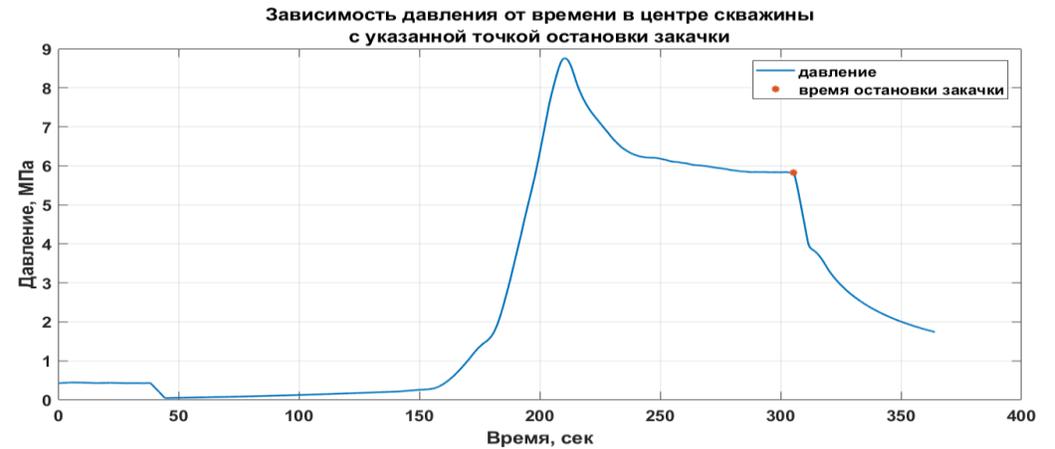
Характерные параметры кривой давления



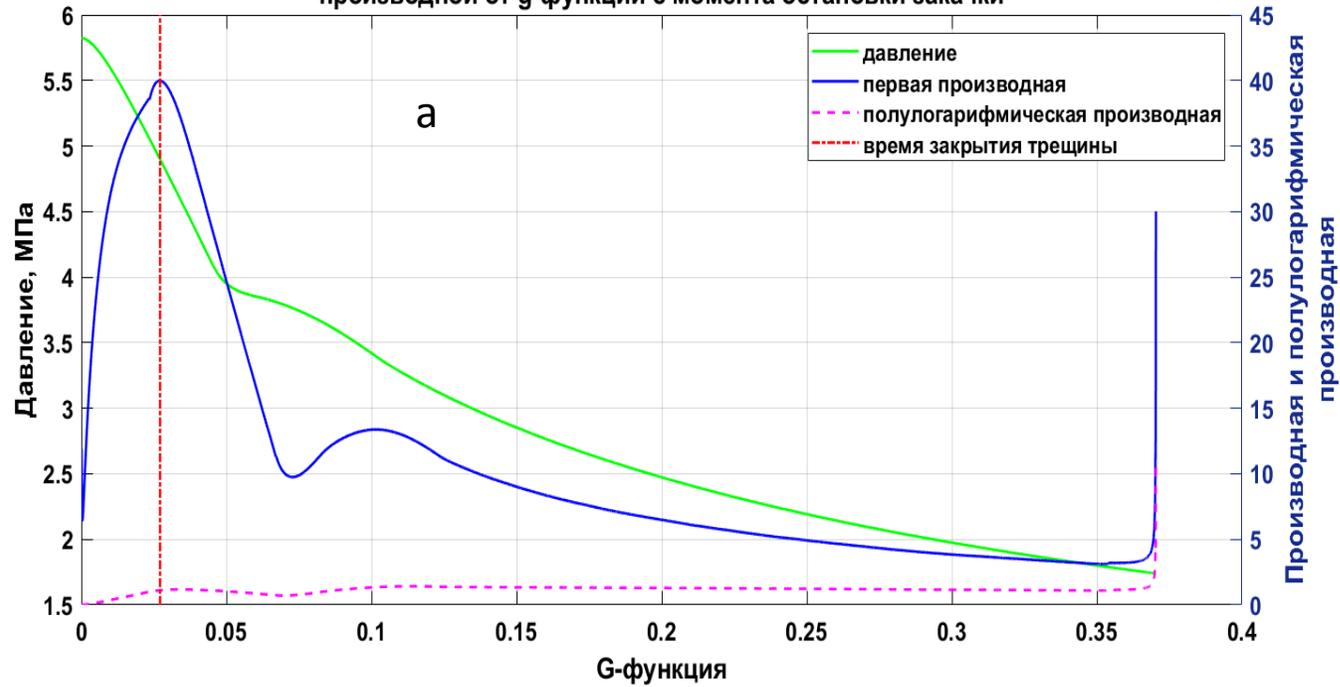
$$FBP = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} + \sigma_p, \quad (1)$$

$$FPP = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max}, \quad (2)$$

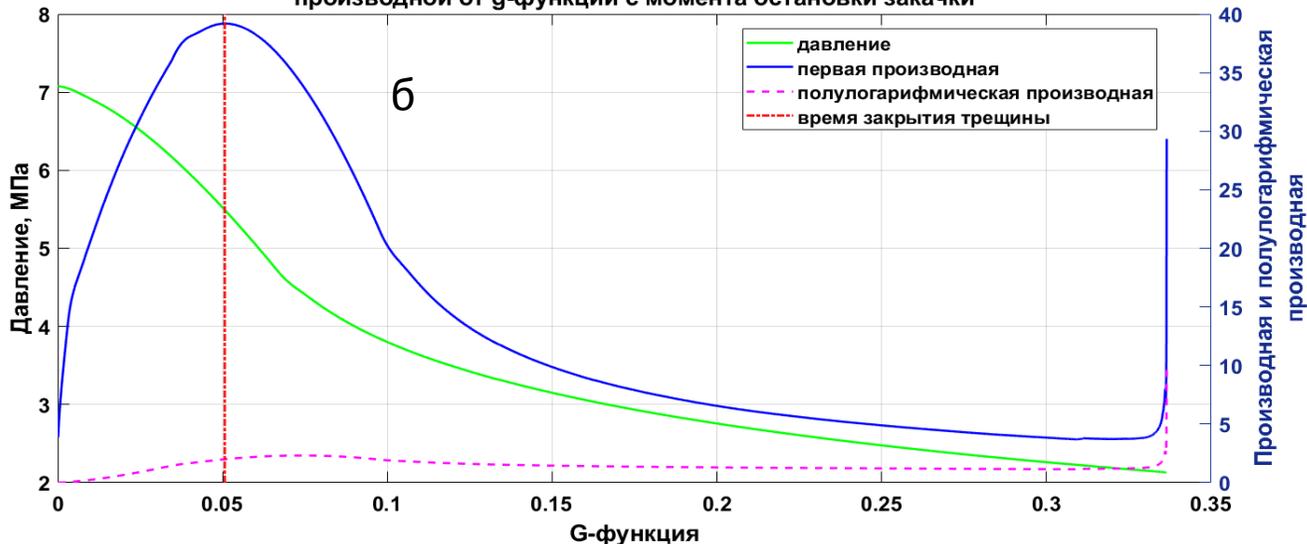
$$FCP = \sigma_{\min}, \quad (3)$$



Зависимость давления, его производной и полулогарифмической производной от g-функции с момента остановки закачки



Зависимость давления, его производной и полулогарифмической производной от g-функции с момента остановки закачки



Давление закрытия трещины, определенное по методу G-функции 4.9 Мпа (а) и 5.5 (б), оказывается много больше минимальных напряжений 0.55 МПа.

$$G(\delta_0, \delta) = \frac{16}{3\pi} [(1 + \delta)^{3/2} - \delta^{3/2} - (1 + \delta_0)^{3/2} + \delta_0^{3/2}]$$

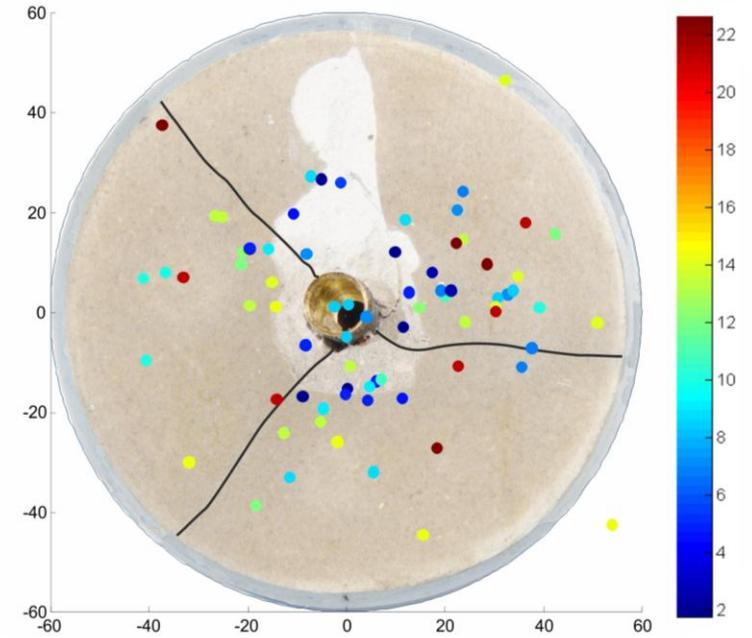
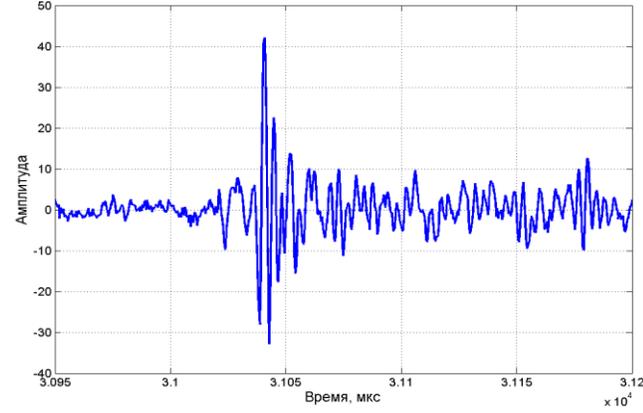
$$\delta = \frac{\Delta t}{t_0} = \frac{t - t_0}{t_0}$$

Nolte, K. G.: “Determination of Fracture Parameters from Fracturing Pressure Decline,” Las Vegas (1979).

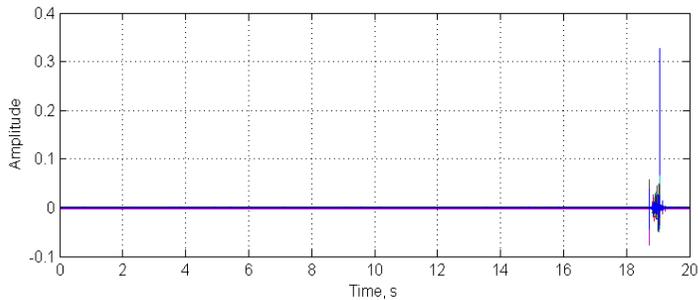
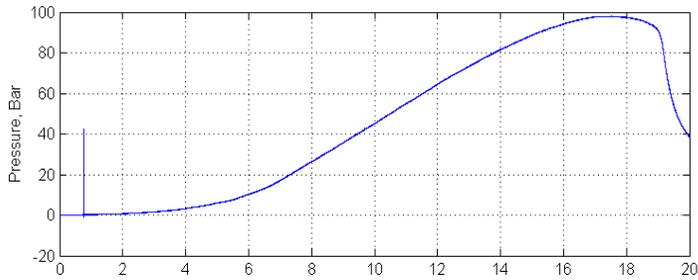
Nolte, K. G., Maniere, J. L., Owens, K. A.: “After-Closure Analysis of Fracture Calibration Tests,” Texas (1997).

Hickman S.H., Zoback M.D.: “The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data for in situ stress determination. Hydraulic Fracturing Measurements.” Washington (1983).

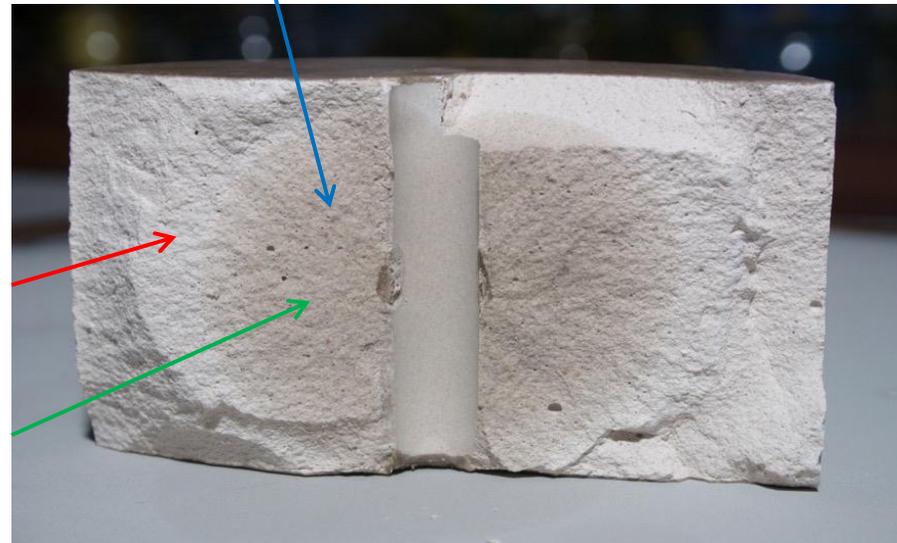
МикроГРП в лабораторных условиях с использованием маловязкой жидкости (вода).

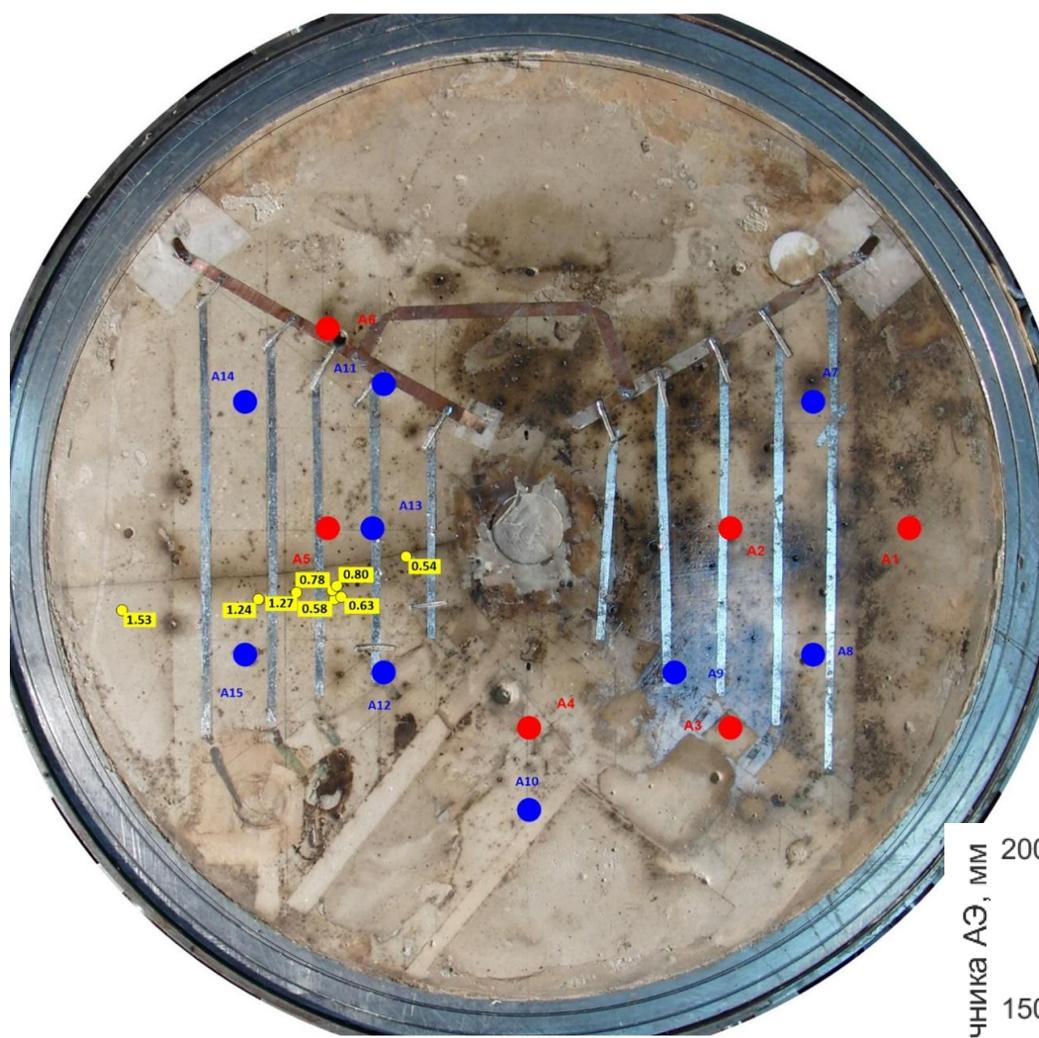


Область окружающего порового пространства, заполнившаяся жидкостью при проведении ГРП

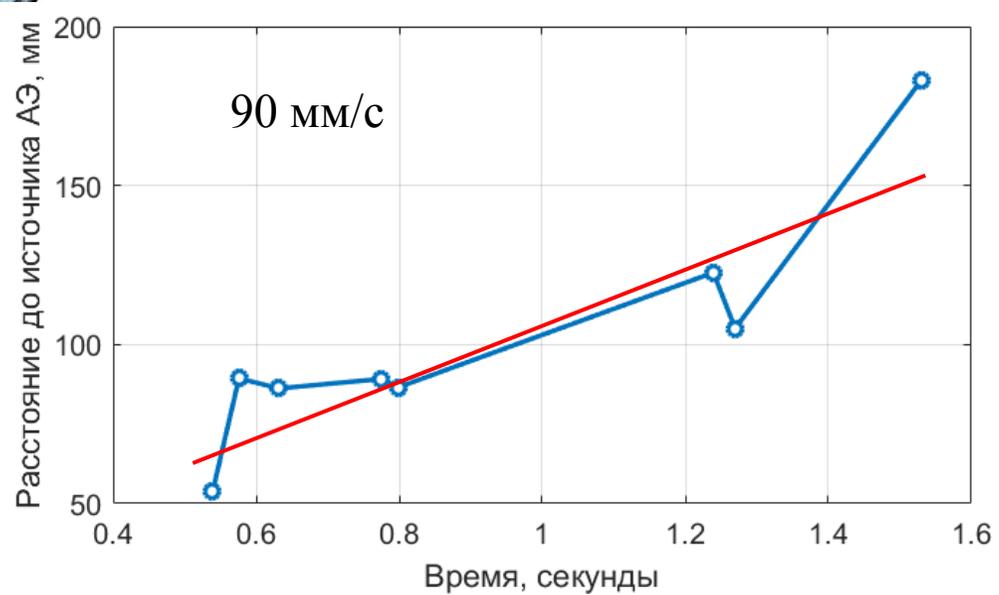
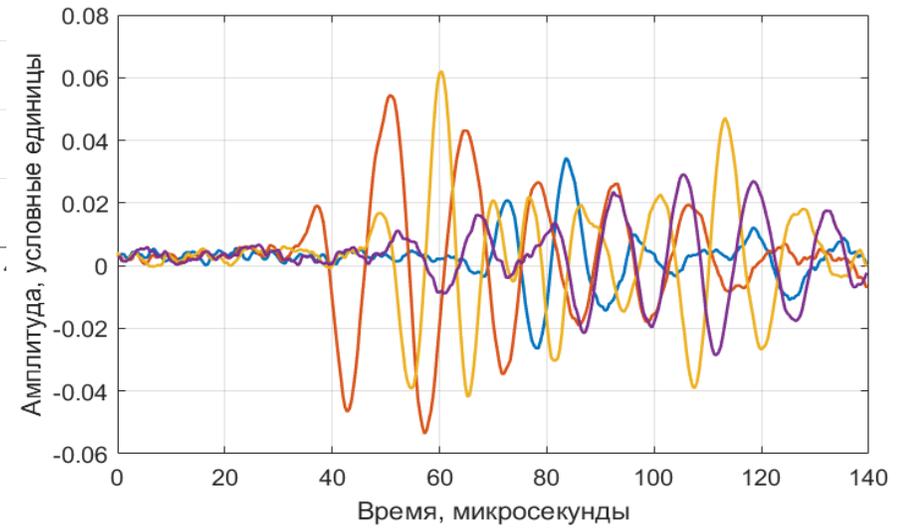
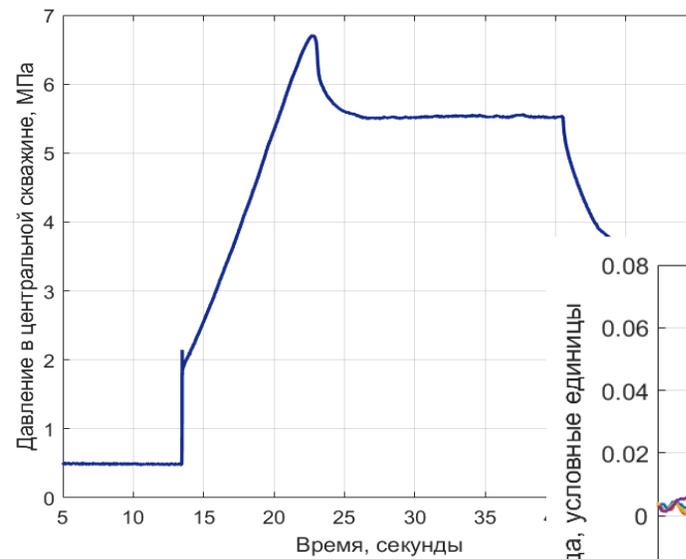


Сухая часть трещины
Часть трещины, заполненная жидкостью





ГРП с использованием вязкой жидкости (минеральное масло)



Результаты

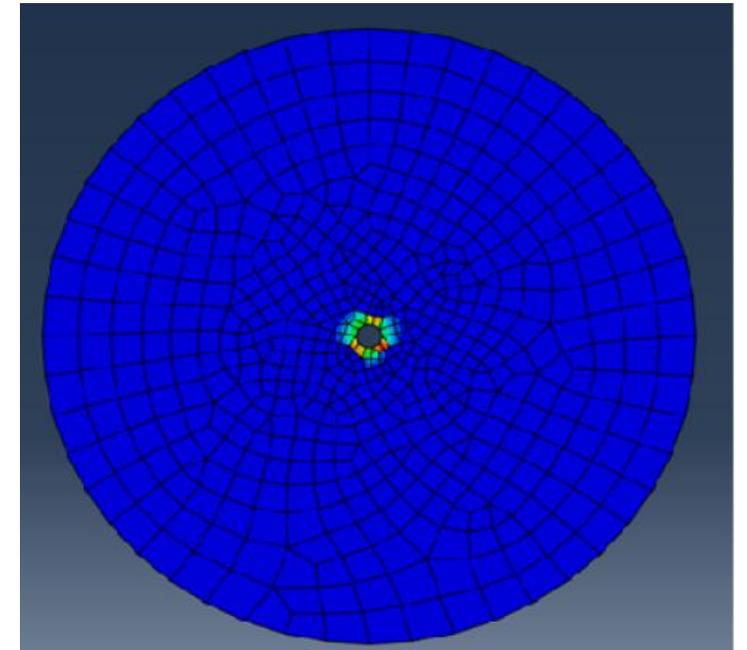
- Условием появления вторичной трещины ГРП является значительное изменение ориентации осей главных напряжений.
- Развитие трещин ГРП происходит в три этапа:
 - возникновение сухой трещины,
 - заполнение трещины жидкостью,
 - раскрытие трещины
- Скорость роста сухой трещины оценивается в 130 мм/с
- Скорость заполнения жидкостью в экспериментах составила 35 мм/с.
- Давление раскрытия и закрытия трещины в первом приближении линейно зависят от минимального главного напряжения
- Давление образования и закрытия трещины не определяются простейшими используемыми моделями
- В случае, когда вязкость жидкости ГРП существенно превышает вязкость пластового флюида, не возникает условий для появления микросейсмических событий вне трещины ГРП

Заключение

Причины расхождения простейших модельных представлений и результатов экспериментов:

1. Пластическая деформация материала, предваряющая образование трещин
2. Изменение коэффициента трещиностойкости
3. Неопределенность критерия образования трещины
4. Диффузия порового давления в окружающее пространство (back pressure)
5. Отставание заполнения жидкостью трещины от времени образования и распространения трещины ГРП

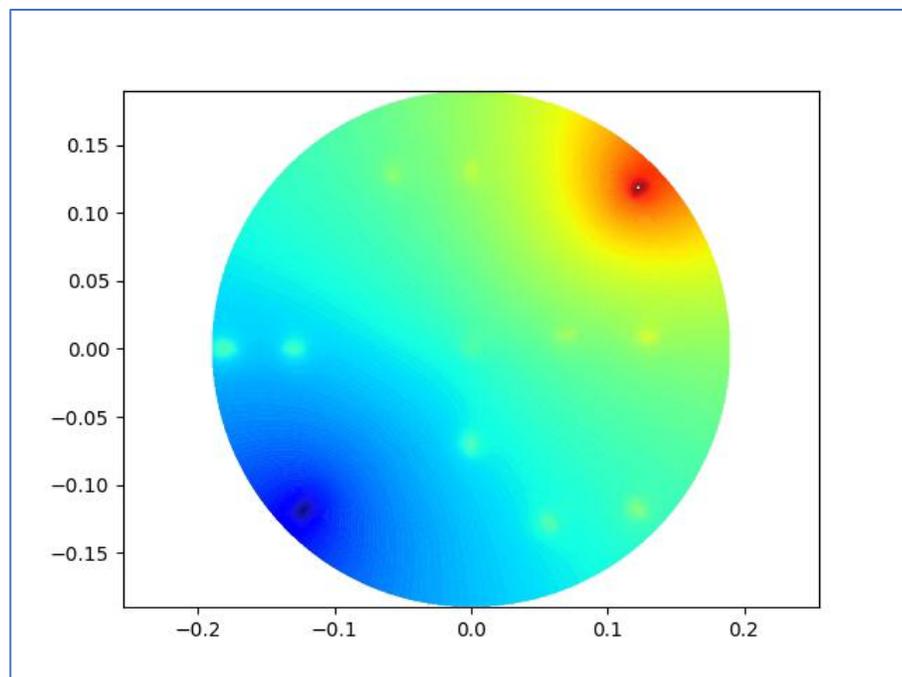
Дальнейшее развитие моделей, включение нелинейных пороупругих эффектов, учет раскрытия, роста трещин и их влияния на фильтрацию – все это позволит более адекватно описывать результаты наблюдений и решать задачу оценки режимов и магнитуд индуцированных сейсмических событий и их связи с процессами разработки



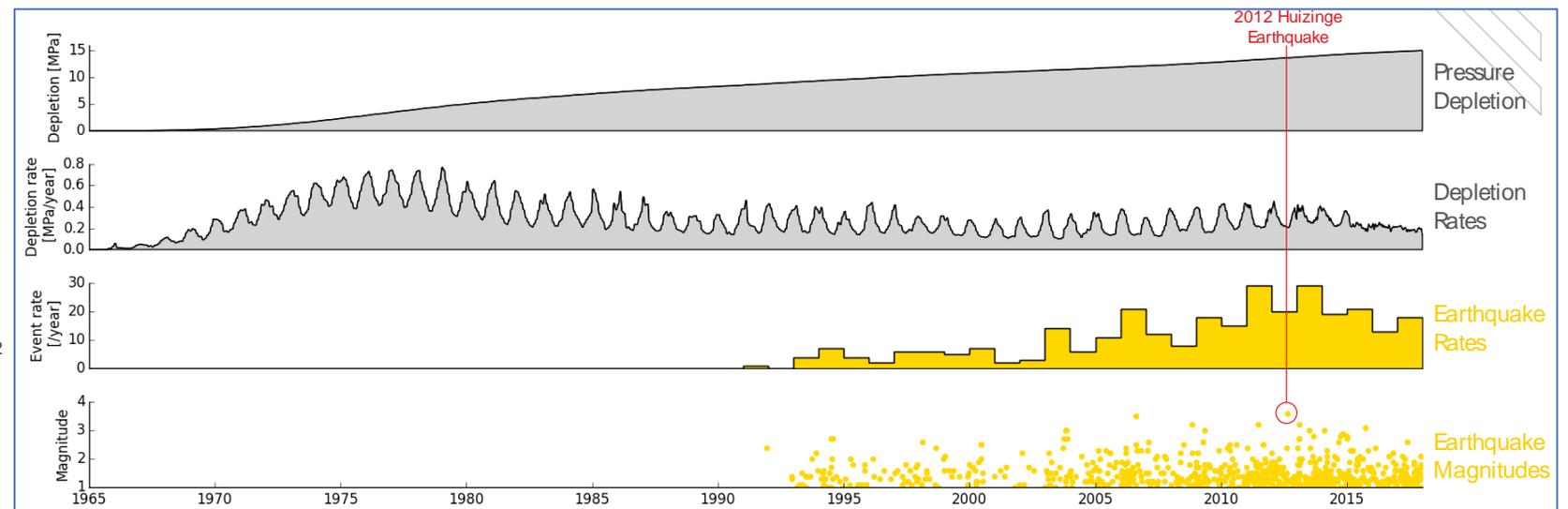
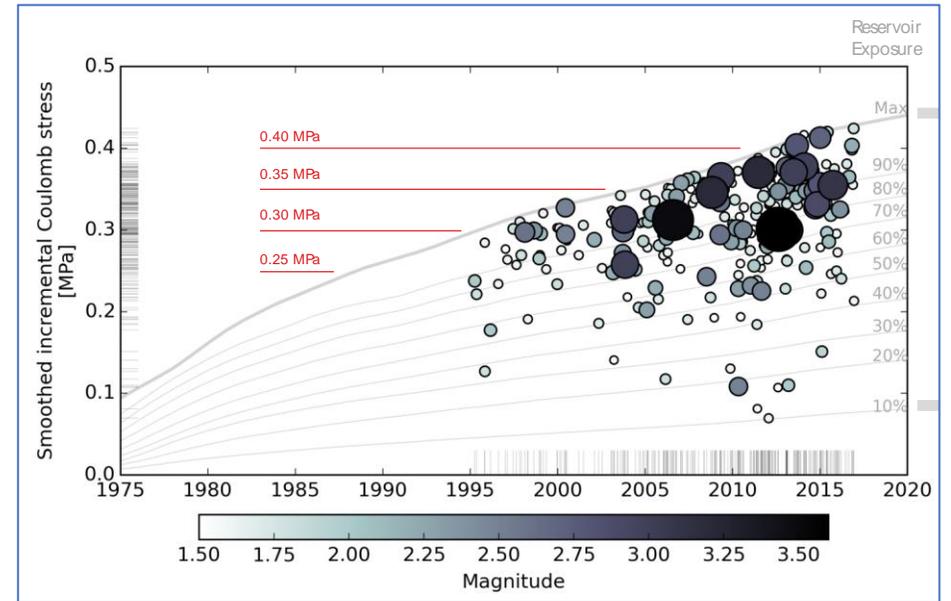
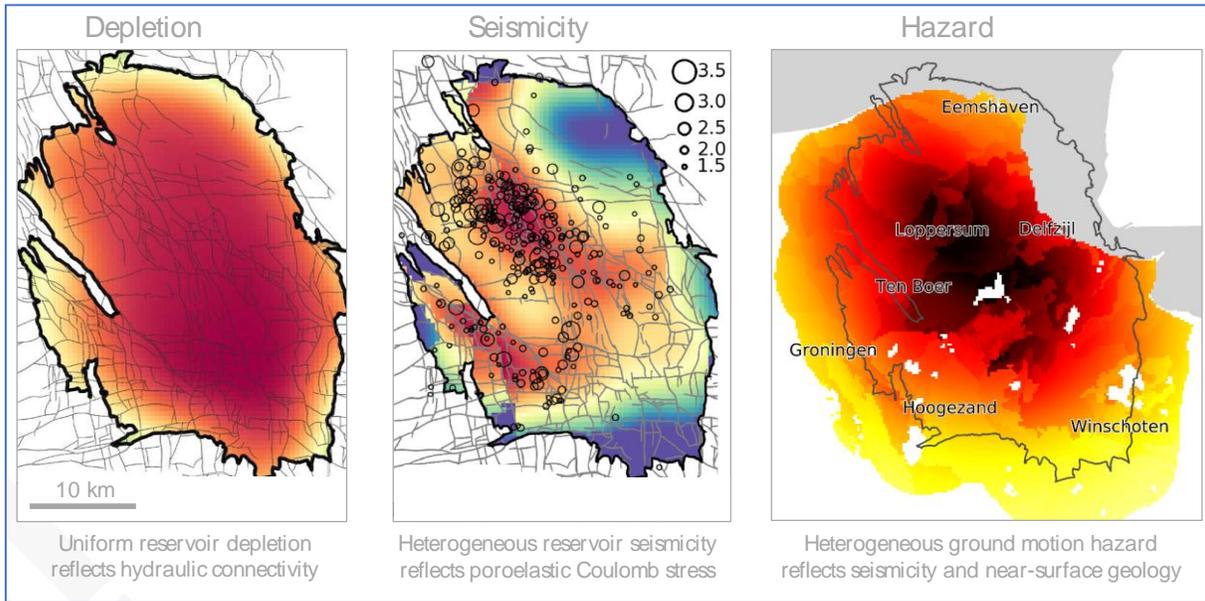
References

- M. Trimonova, N. Baryshnikov, E. Zenchenko, P. Zenchenko, S. Turuntaev. Study of Hydraulic Fracture Influence on the Surrounding Rock Permeability. // 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 Paris, France, 12-15 June 2017, DOI: 10.3997/2214-4609.201701322.
- M. Trimonova, N. Baryshnikov, E. Zenchenko, P. Zenchenko, S. Turuntaev. The Study of the Unstable Fracture Propagation in the Injection Well: Numerical and Laboratory Modeling. // SPE-187822-MS. 2017. DOI: 10.2118/187822-MS
- Turuntaev, SB; Zenchenko, EV; Zenchenko, PE; Trimonova, MA; Baryshnikov, NA and Aigozhieva, AK. An influence of pore pressure gradient on hydraulic fracture propagation [online]. In: 9th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM9). Sydney: Engineers Australia, 2017: [712]-[723].
- Trimonova M., Zenchenko E., Baryshnikov N., Turuntaev S., Zenchenko P., Aigozhieva A. (2018) Estimation of the Hydraulic Fracture Propagation Rate in the Laboratory Experiment. In: Karev V., Klimov D., Pokazeev K. (eds) Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. PMMEEP 2017. Springer Geology. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-77788-7_27
- *Dubinya N., Trimonova M., Tyurin A., Golovin Yu., Zenchenko E., Samodurov A., Turuntaev S., Fokin I.* Experimental and Theoretical Study of Fracture Toughness Effect on Hydraulic Fracture's Geometry // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2018. SPE-191630-MS, <https://doi.org/10.2118/191630-18RPTC-MS>.
- [M.A. Trimonova](#), [E.V. Zenchenko](#), [P.E. Zenchenko](#), [S.B. Turuntaev](#) and [N.A. Baryshnikov](#). [Determination of the Fracture Opening Pressure: Experiment Vs. Theory.](#) // [Geomodel 2018](#). DOI: 10.3997/2214-4609.201802421
- Trimonova M.A. Zenchenko E.V. Turuntaev S.B., Golovin Yu.I., Samodurov A.A., Tyurin A.I., Dubinya N.V. Rock Toughness Importance For Hydraulic Fracture Modelling. AIP Conference Proceedings **2051**, 020308 (2018), DOI: [10.1063/1.5083551](https://doi.org/10.1063/1.5083551)
- Sergey Turuntaev, Evgeny Zenchenko, Maria Trimonova, Petr Zenchenko, Nikolay Baryshnikov, and Akbota Aigozhieva. Interactions of hydraulic fractures. // Advances in Mechanics: Failure, Deformation, Fatigue, Waves and Monitoring. Proceedings of The 11th International Conference on Structural Integrity and Failure. Perth. PP. 88-94. 2018.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**



Месторождение Groningen, Нидерланды



Stephen Bourne¹, Steve Oates¹, Jan van Elk²

¹ Shell Global Solutions International B.V., The Netherlands

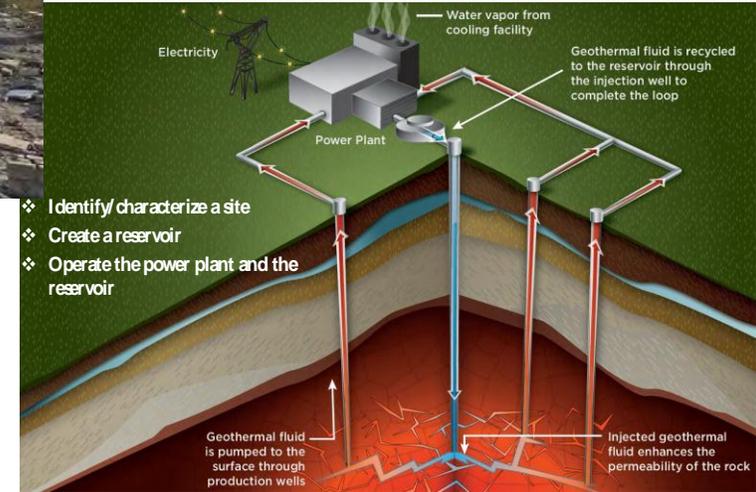
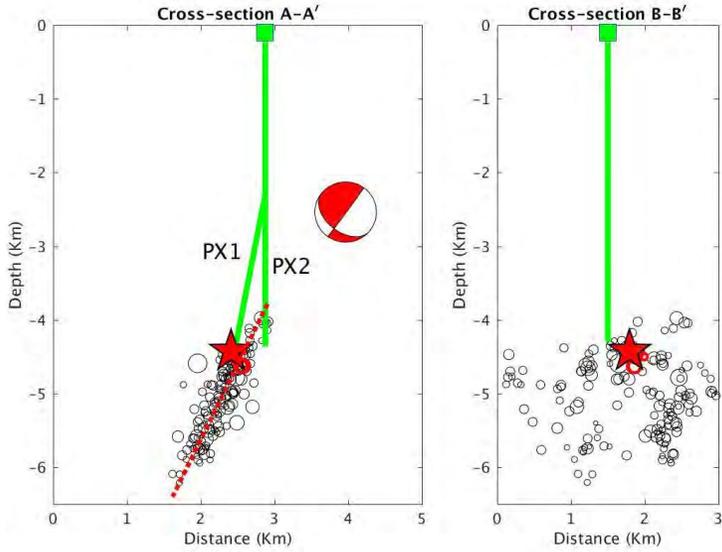
² Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., The Netherlands

Землетрясение M=5.4 Pohang, Южная Корея, 15.11.2017

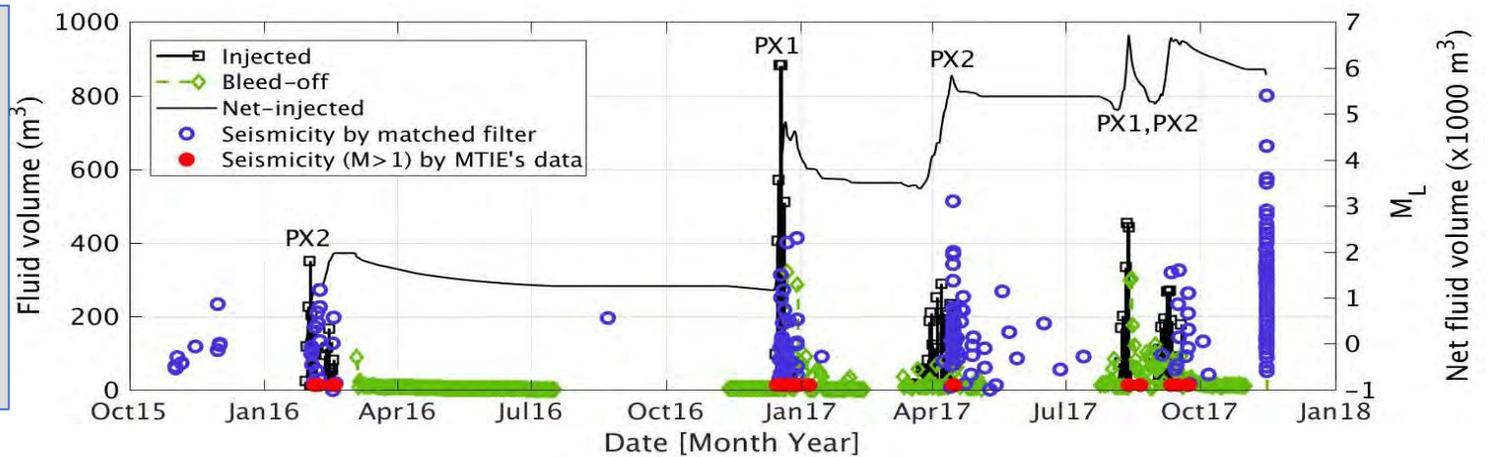
135 потерпевших
297 млн. долларов ущерб
4.5 км глубина гипоцентра

Kwang-Hee Kim^{1*}, Jin-Han Ree^{2*}, YoungHee Kim³
Sungshil Kim², Su Young Kang¹, Wooseok Seo³

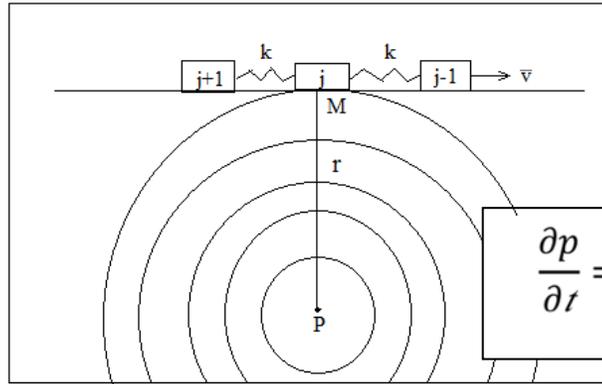
¹Pusan National University
²Korea University
³Seoul National University



Первая закачка 29.01.2016
Последняя закачка 18.09.2017
Общий объем закачанной воды 12 789 куб.м
Объем извлеченной воды 6 957 куб.м
Дисбаланс 5 841 куб.м



Модели сейсмичности при изменении порового давления



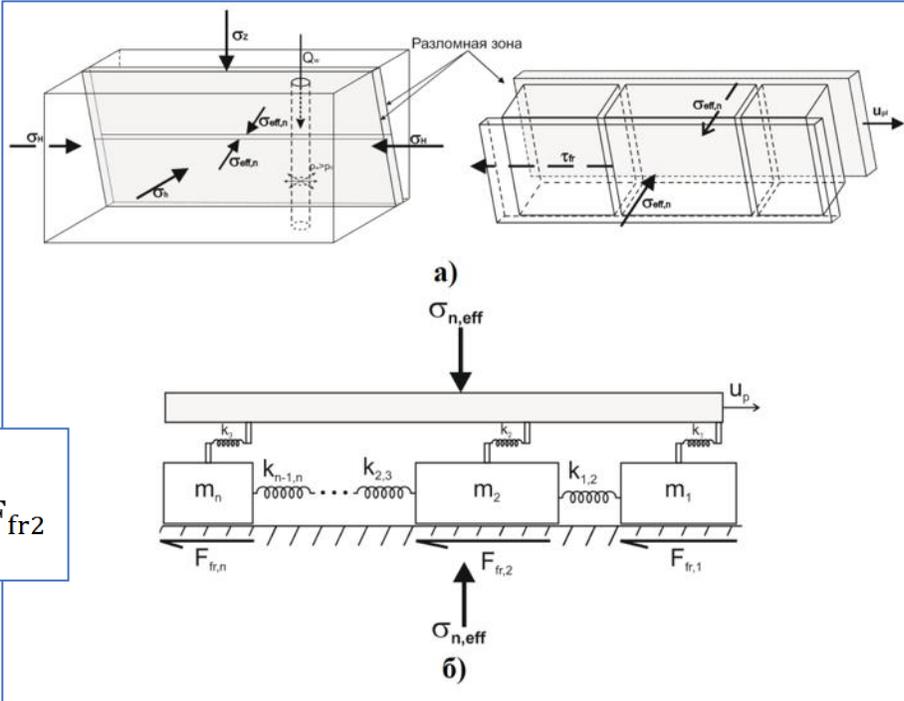
$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} p \right)$$

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

$$M_0 = G \int D dS$$

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

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



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

$$\tau^* = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$

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

Применение модели для случая Базеля

