

Distinguished Lecturer Program

Primary funding is provided by

**The SPE Foundation through member donations
and a contribution from Offshore Europe**

The Society is grateful to those companies that allow their
professionals to serve as lecturers

Additional support provided by AIME



Society of Petroleum Engineers
Distinguished Lecturer Program
www.spe.org/dl

Releasing Shale-Gas Potential with Fractured Horizontal Well

**Реализация потенциала месторождений сланцевого
газа с помощью ГРП в горизонтальных скважинах**

Erdal Ozkan
Эрдаль Озкан



COLORADO SCHOOL OF MINES

Society of Petroleum Engineers
Distinguished Lecturer Program
www.spe.org/dl

SHALE

GAS

СПАНЦЕВЫЙ ГАЗ

**A NEW
WORLD OF
OPPORTUNITIES**

НОВЫЙ МИР НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ



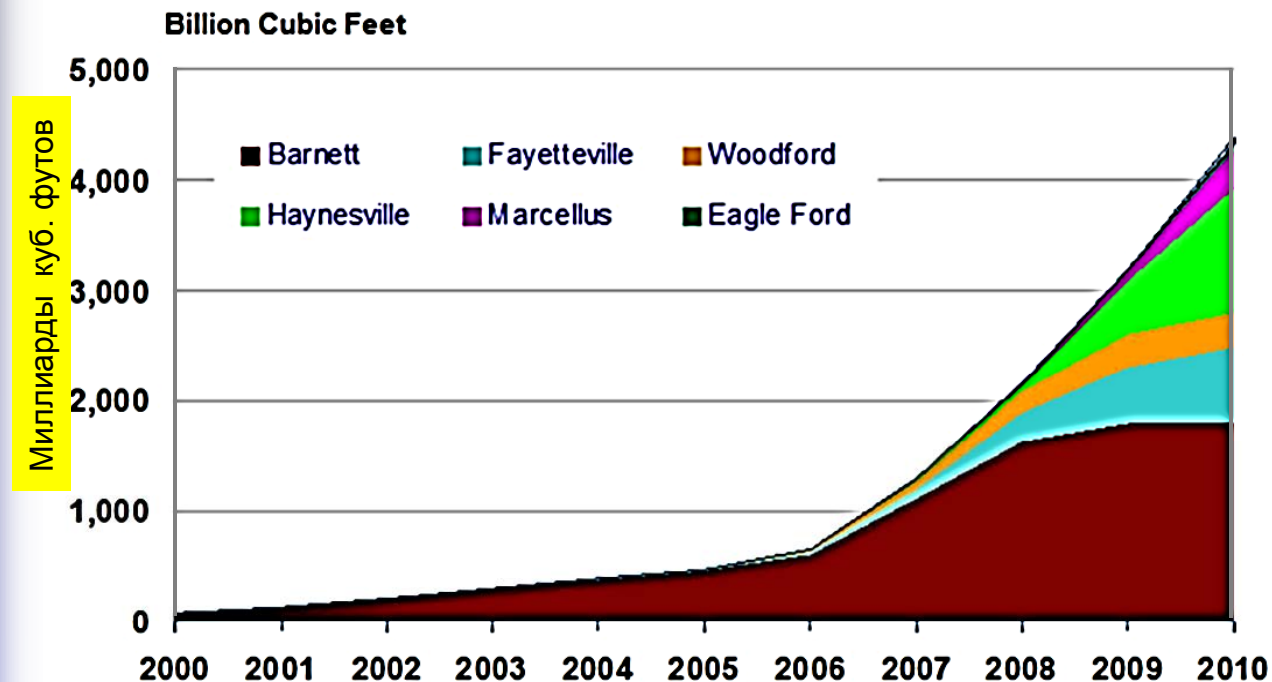
US gas potential increased 4 to 6 times from 1998 to 2008

За период 1998-2008 потенциал газодобычи в США вырос в 4 – 6 раз
(с 150 до 500-1000 трлн. куб. футов)

(150 Tcf in 1998 and 500-1000 Tcf in 2008 – Arthur, 2008)

This is due to the economic success of the shale plays

Тому причиной рентабельная разработка залежей газа в сланцах



Source/ИСТОЧНИК – IAE, Lippman Consulting

Key Characteristics of Production from Unconventional Reservoirs

Главные особенности добычи газа из нетрадиционных коллекторов

Small pore sizes (nanoscale) $10^{-9} \text{ m} \leq d_{pore} \leq 10^{-6} \text{ m}$

Малые размеры пор (наноразмеры)

Ultra tight formation $10^{-9} \text{ mD} \leq k \leq 10^{-3} \text{ mD}$

Сверхнизкая проницаемость

Involvement of source rock

Материнские породы могут слагать продуктивный интервал

Natural fractures

Природная трещиноватость

Hydraulically fractured horizontal wells

ГРП в горизонтальных стволах

...

...

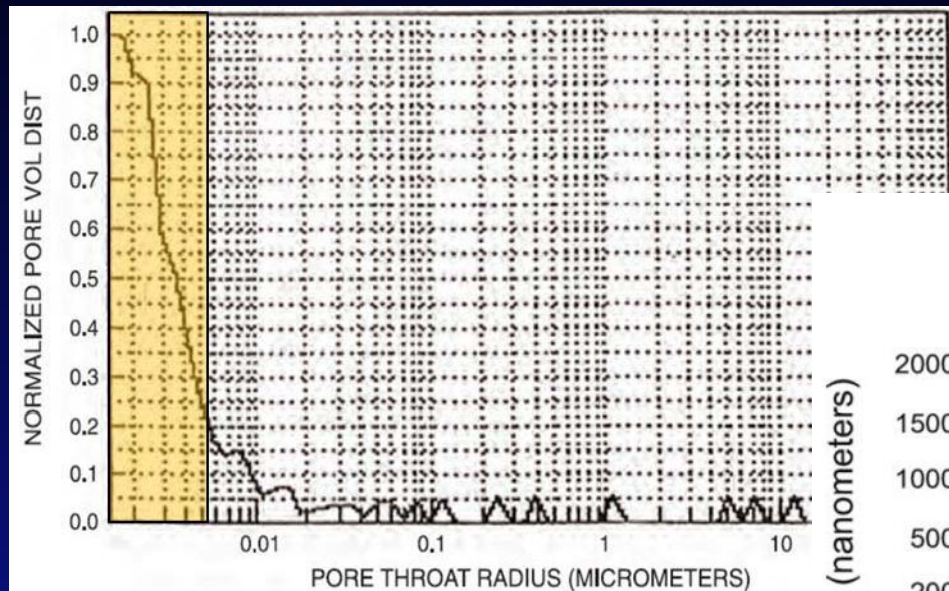
Pore size distribution of Barnett siliceous mudstone samples

Распределение пор по размерности в кремнистых алевропелитах формации Барнетт

Capillary pressure analysis
Анализ капиллярного давления

Most pore sizes are in
5 to 15 nanometers range

Размер большинства пор равен 5-15 нм

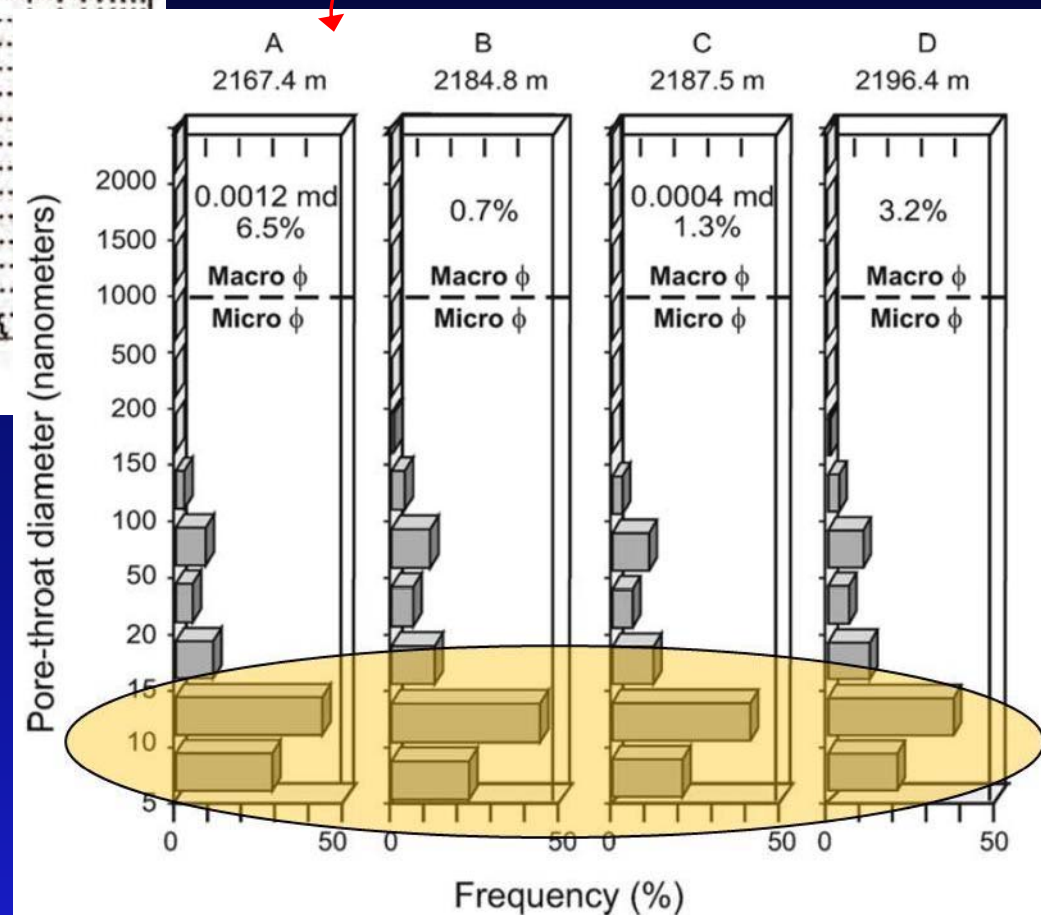


Mercury porosimeter analysis

Ртутная порометрия

80% of the pores have a pore size
less than 5 nanometers

80% пор имеют размер менее 5 нм



Pore Sizes in Unconventional Reservoirs

Размер пор в нетрадиционных коллекторах

Heterogeneous matrix pore-size distributions

Неравномерное распределение пор разного размера

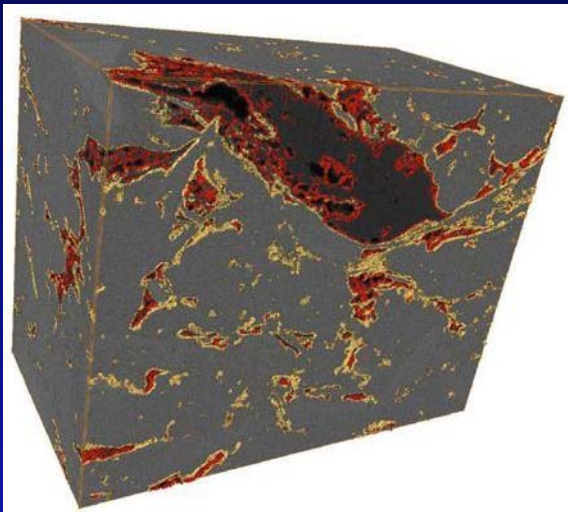
Most matrix pore volume in nanopores

Основной поровый объем приходится на нанопоры

Pore network in shale sample - поровая система в глинистом сланце (Ambrose et al., 2010)

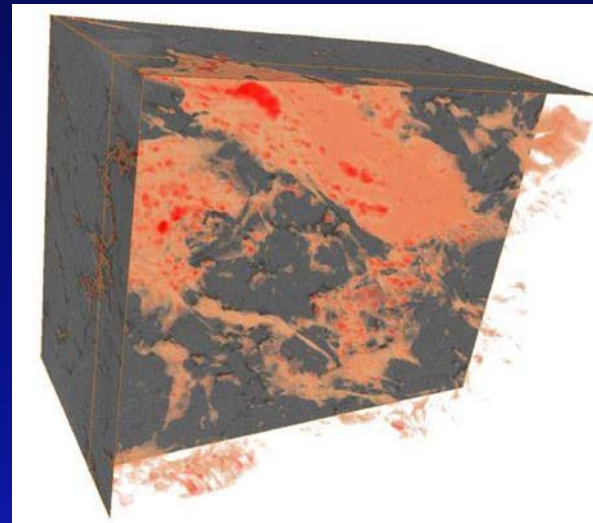
Sample size: 4 μm high, 5 μm wide, and 2.5 μm deep

Размер куба: В 4 мкм, Д 5 мкм, Ш 2,5 мкм



3D Image Showing Surfaces

3D вид граней



2D Image Showing Cross Section

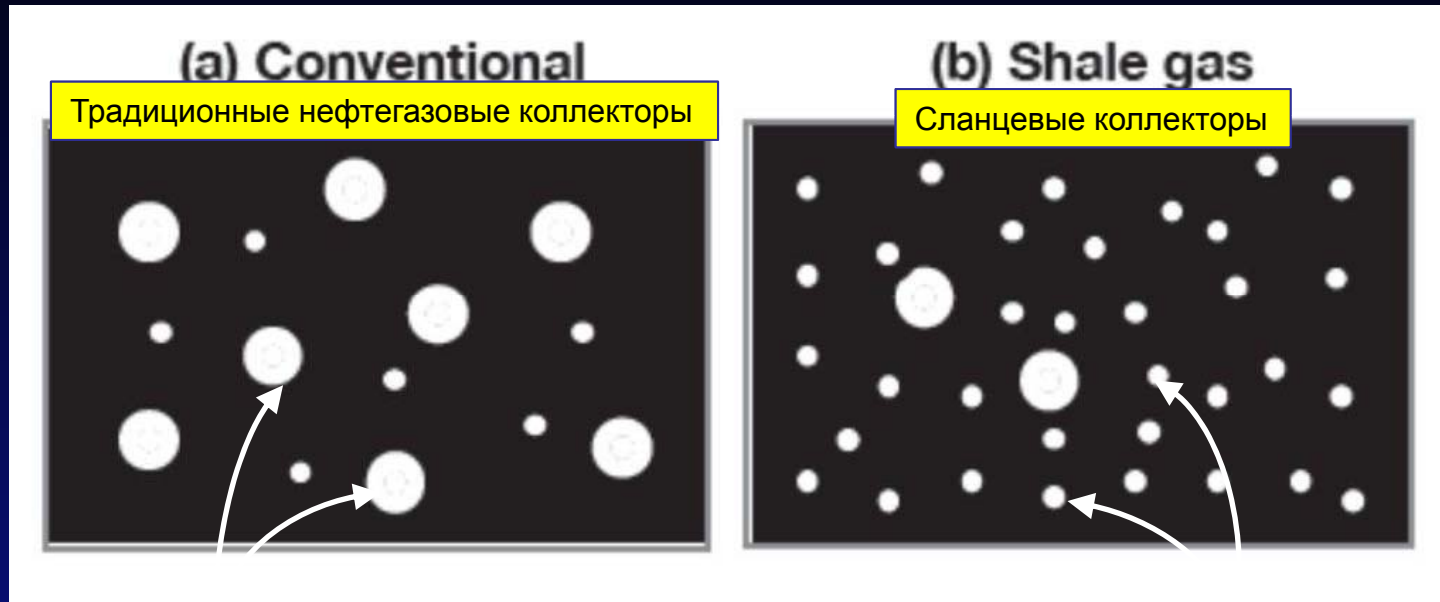
2D вид в разрезе

2D cross-sectional image shows more kerogen and pore space than the surface

2D вид в разрезе демонстрирует большее содержание керогена, больший объем порового пространства, чем видно на поверхности

Porosity and Permeability Ranges

Диапазоны пористости и проницаемости



Micro-pores - микропоры

Традиционные нефтегазовые коллекторы

Conventional oil and gas

$$d_{pore} \geq 1 \mu\text{m}$$

$$k \geq 1\text{mD}$$

Плотные коллекторы

Tight gas

$$1 \mu\text{m} \geq d_{pore} \geq 10^{-3} \mu\text{m}$$

$$1\text{mD} \geq k \geq 1\mu\text{D}$$

Nano-pores - нанопоры

Сланцевые коллекторы

Shale gas

$$10^{-1} \mu\text{m} \geq d_{pore} \geq 10^{-2} \mu\text{m}$$

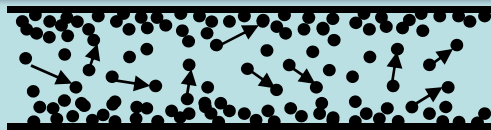
$$1 \mu\text{D} \geq k \geq 10^{-3} \mu\text{D}$$

FLOW REGIMES IN POROUS MEDIA

РЕЖИМЫ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Moderate Velocity, No-Slip Flow (Darcy's Law)

Средняя скорость фильтрации без скольжения фаз (закон Дарси)



Linear and Laminar Flow: Moderate ρ , ν , & k
Micro-pores

Линейный или ламинарный поток – средние значения ρ , ν , k
Микропоры

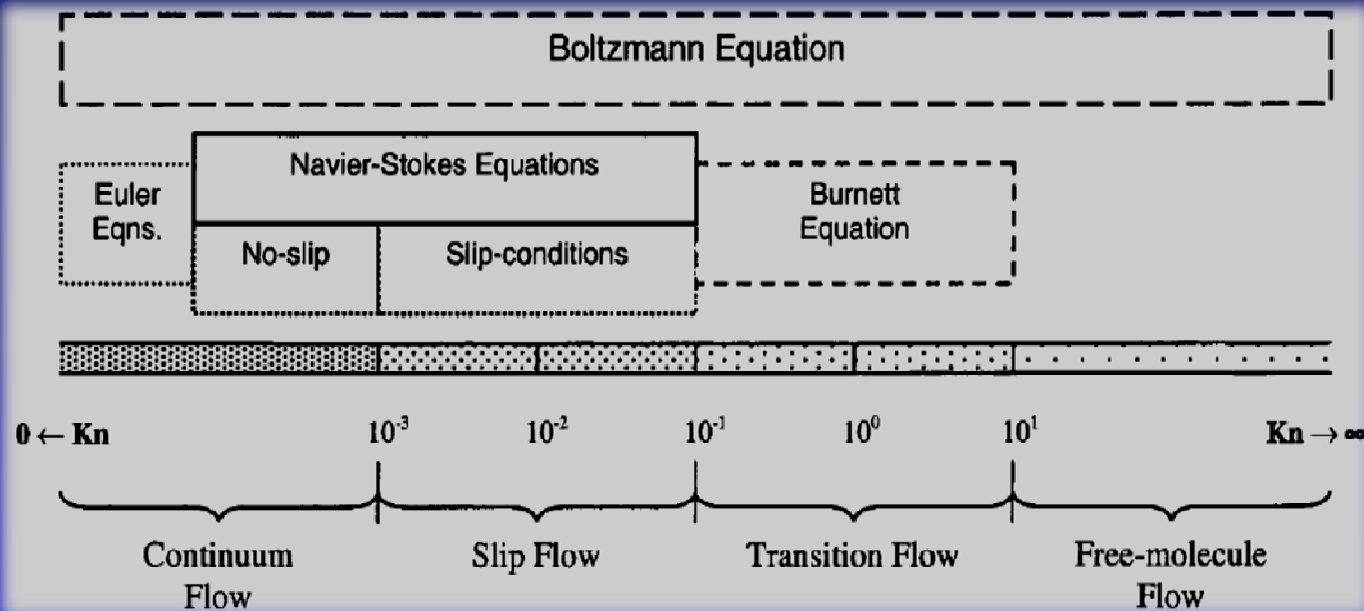
Low Velocity, Slip Flow (Klinkenberg effect)

Низкая скорость фильтрации со скольжением фаз (эффект Клинкенберга)



Non-Linear Flow: Low ρ , ν , & k
Nano-pores

Нелинейный поток – низкие значения ρ , ν , k
Нанопоры

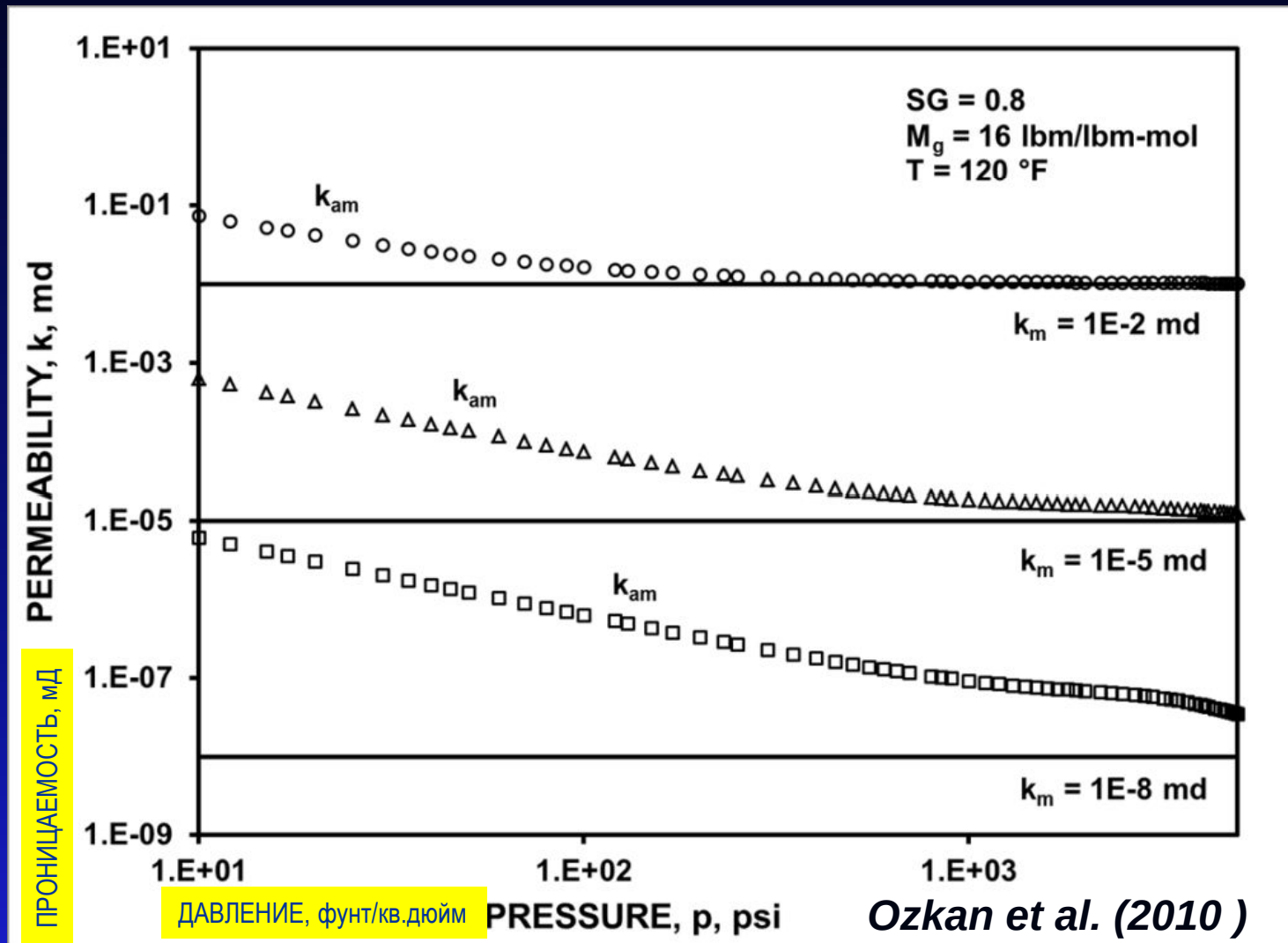


Mixed Flow in Shale Matrix

Смешанная фильтрация в глинистых сланцах

Contribution of slip flow to apparent shale permeability

Влияние скольжения фаз на кажущуюся проницаемость сланцев



Fluid flow in Nano-Darcy Shale

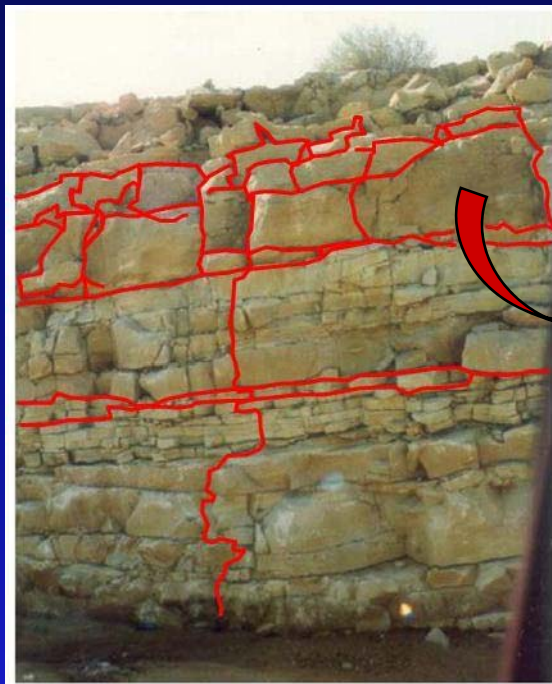
Фiltrация флюида в сланцах со сверхнизкой проницаемостью

“... numerical modeling requires gas permeabilities 2 to 4 orders of magnitude greater than observed to match flow rates and ultimate recoveries ... Some other, higher permeability pathway through shale seems necessary.”

«...для адаптации математических моделей по дебитам и максимальным отборам требуются проницаемости по газу в 2 – 4 раза выше фактически наблюдаемых ... Это указывает на существование иных, более проницаемых путей фильтрации в сланцах»

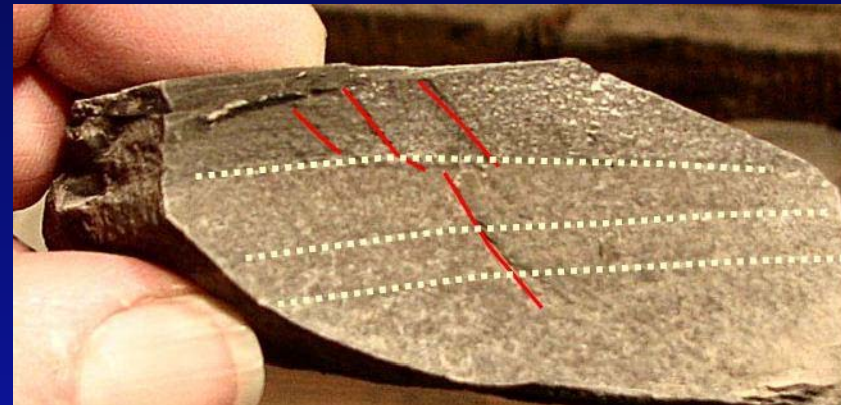
Field Scale (m)

Естественное обнажение (м)



Core
Scale
(cm)
Керн (см)

Cluff, Shanley, and Miller, AAPG 2007



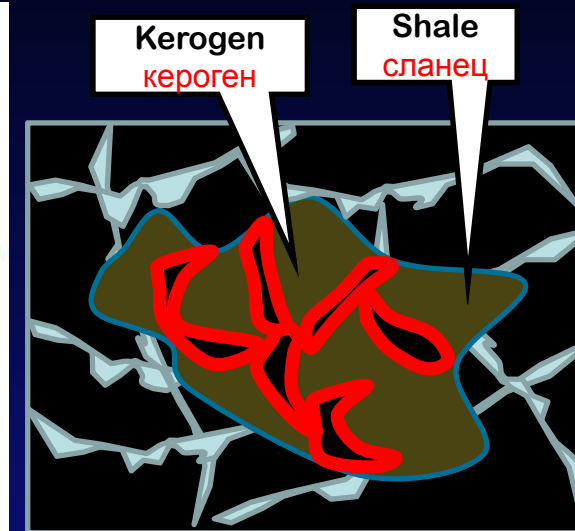
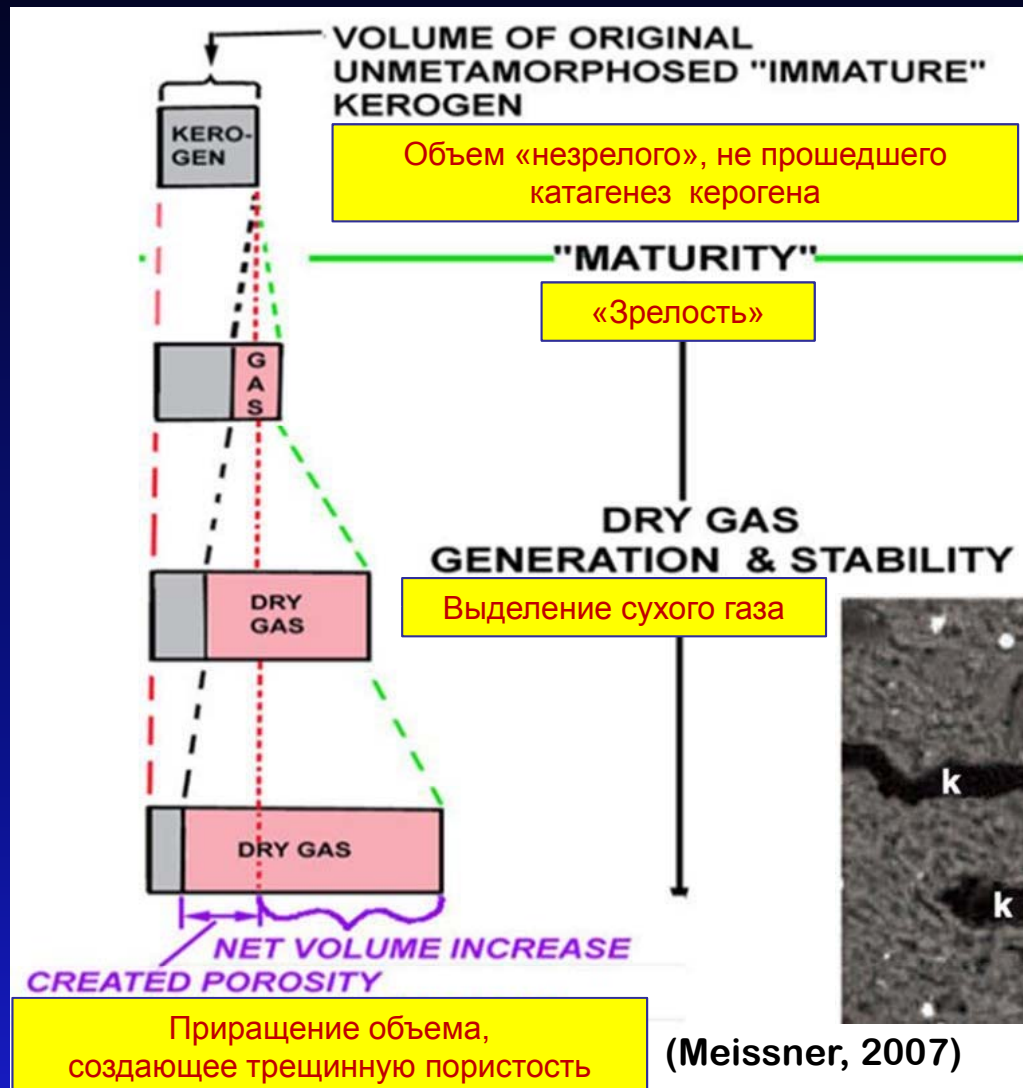
Micro Scale (mm) Микроуровень (мм)

FRACTURES IN SHALE
ТРЕЩИНОВАТОСТЬ В СЛАНЦАХ

THERMAL MATURATION AND MICROFRACTURES

Катагенез и микротрещины

Volume changes in kerogen and generated hydrocarbons during thermal maturation cause microfractures – Изменения объемов керогена и УВ при катагенезе ведут к образованию микротрещин

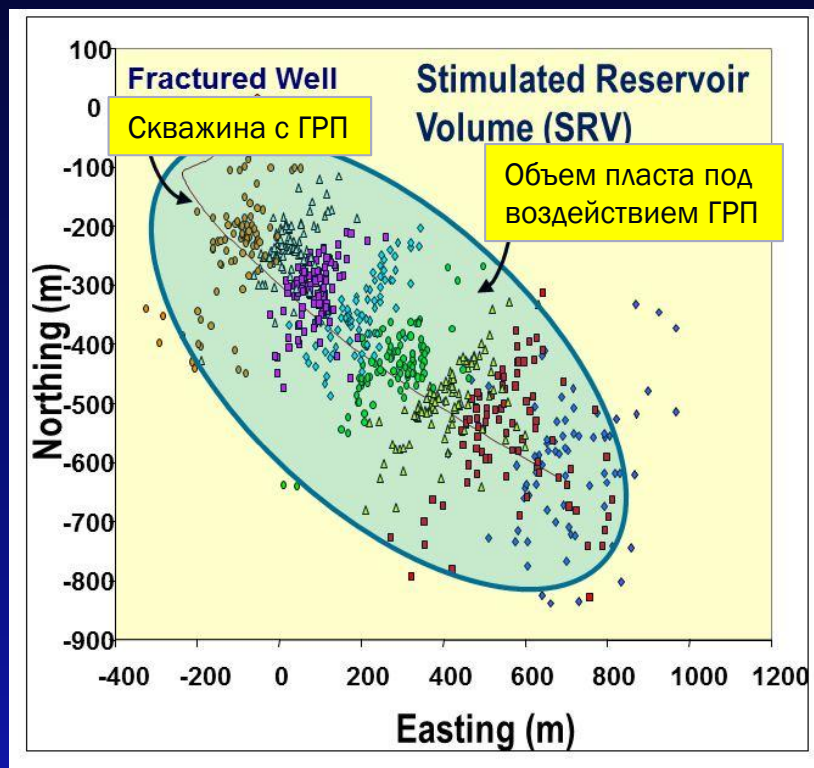


Hydraulic Fracturing Induces and Rejuvenates Fractures in Shale

Проведение ГРП создает новые и обновляет существующие трещины в сланцах

Microseismic Record of Fracturing Events

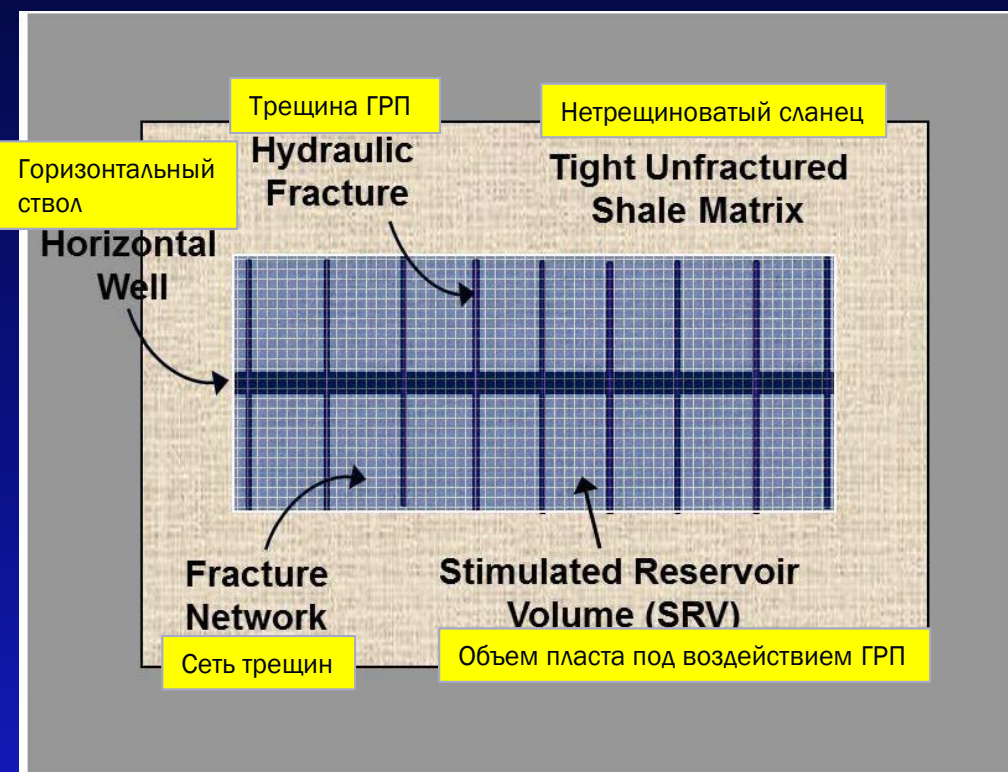
Микросейсмическая регистрация растрескивания пород



From/no Rimrock Energy, SPE 119896

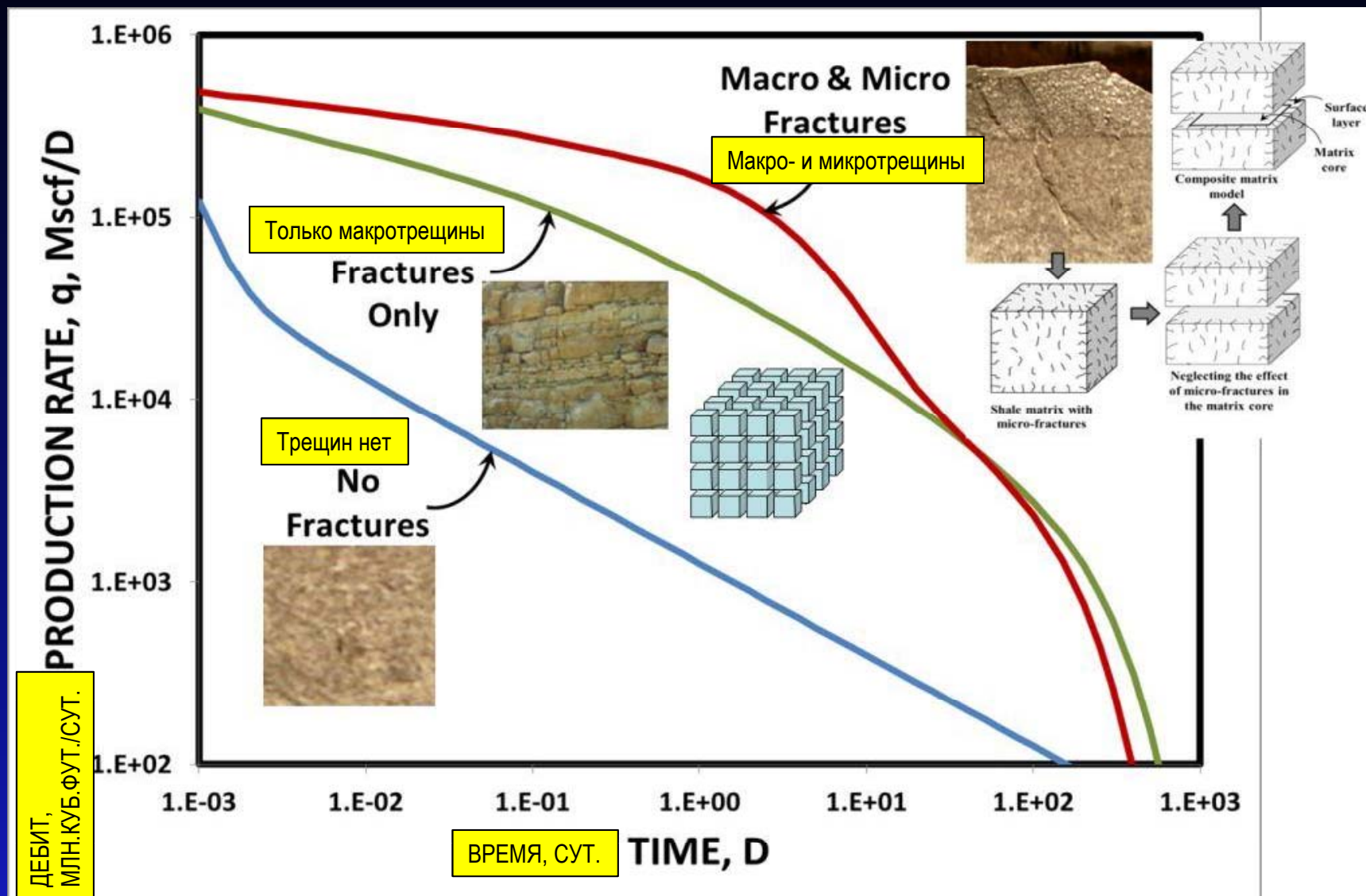
Stimulated Reservoir Volume (SRV) Representation

Объем пласта, затронутый ГРП



Microfractures in shale (currently not characterized)

Микротрещины в сланцах (без их характеристики)



Shale-matrix model with microfractures

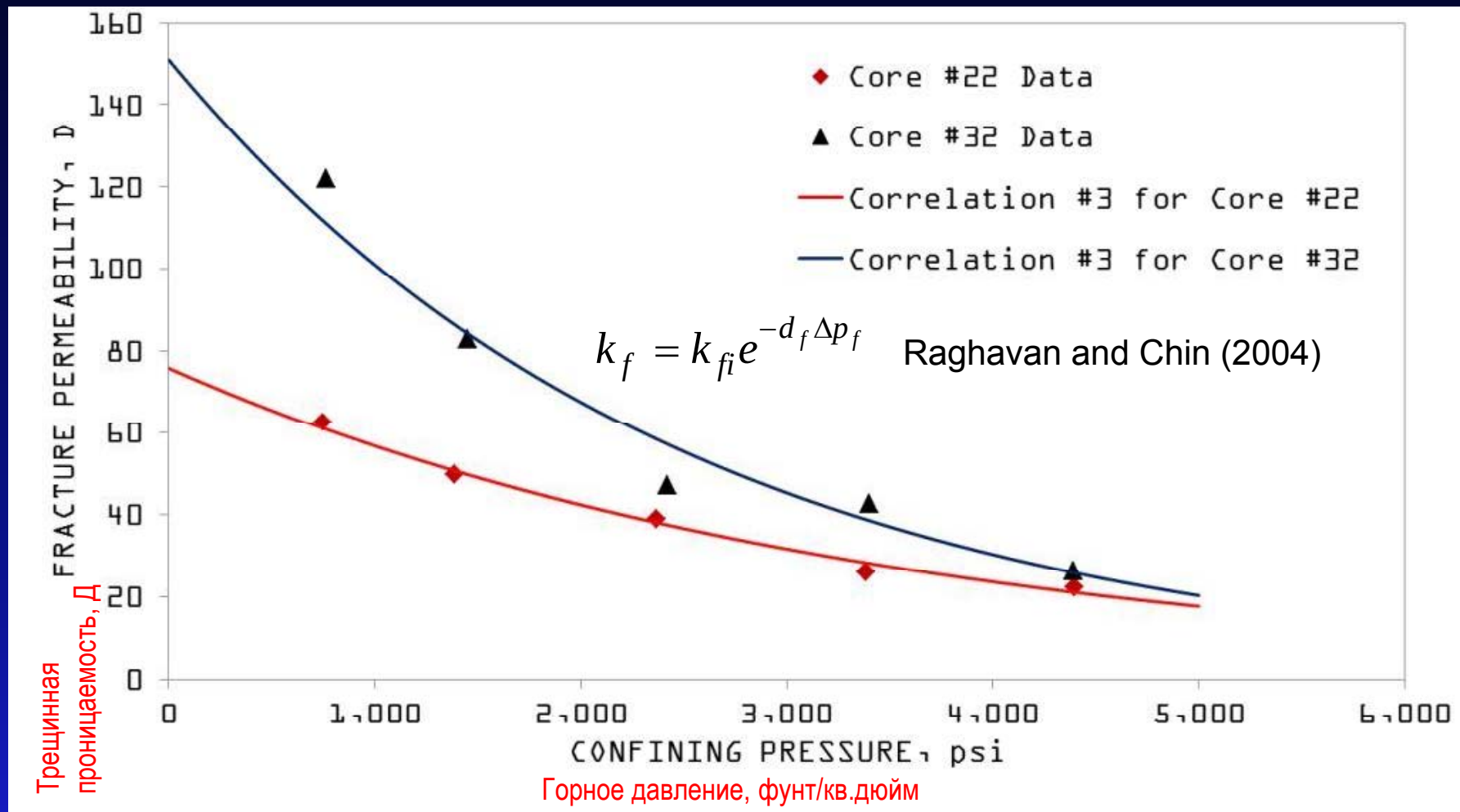
Модель основной массы сланца с микротрещинами (Apaydin et al., 2011)

Pressure-Dependent Fracture Permeability

Зависимость трещинной проницаемости от давления

Experimental Data and Correlation (Cho, 2011)

Опытные данные и их сравнение (Cho, 2011)

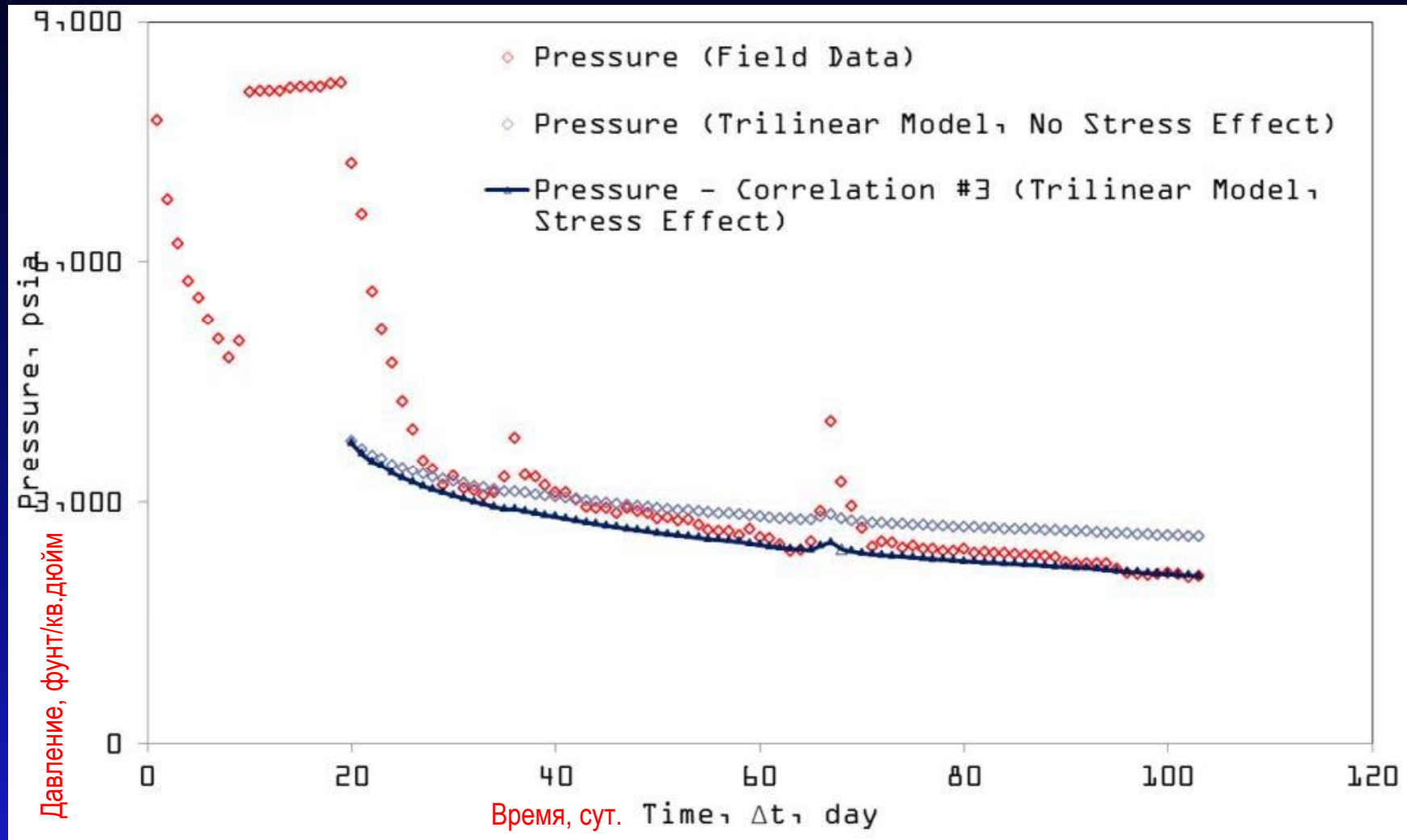


Pressure-Dependent Natural-Fracture Permeability

Зависимость проницаемости естественных трещин от давления

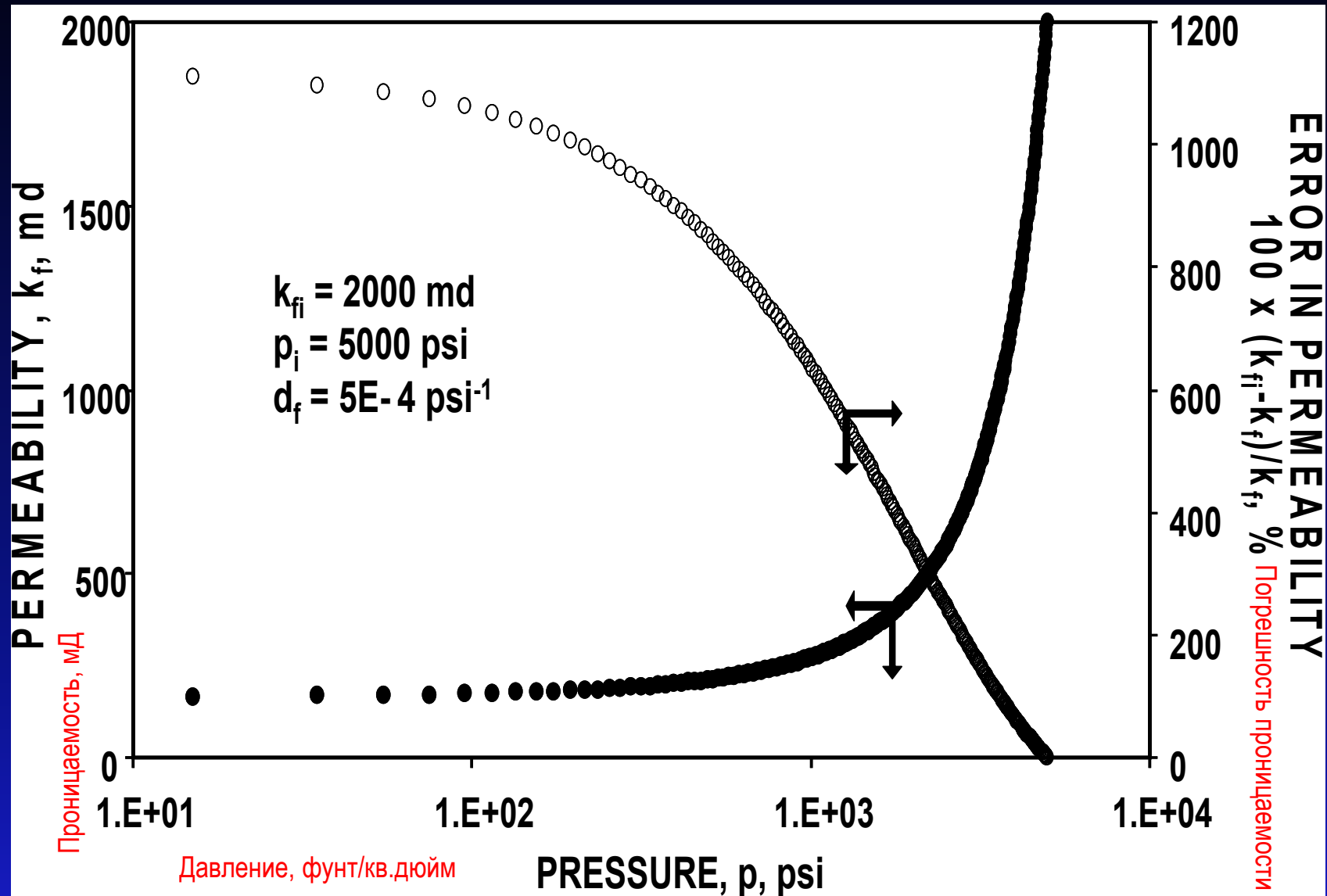
Haynesville Well History Matching (Cho, 2011)

Адаптация по скважине Хейнесвилль



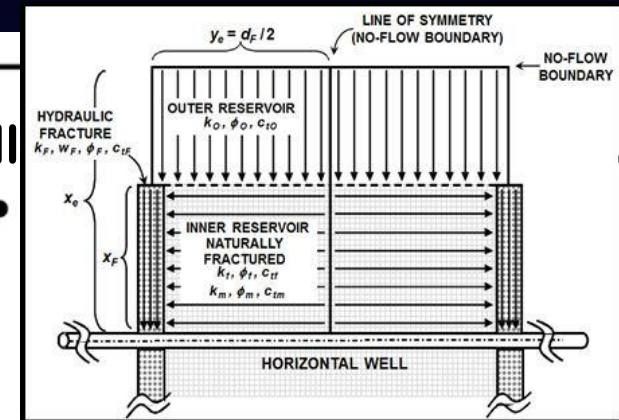
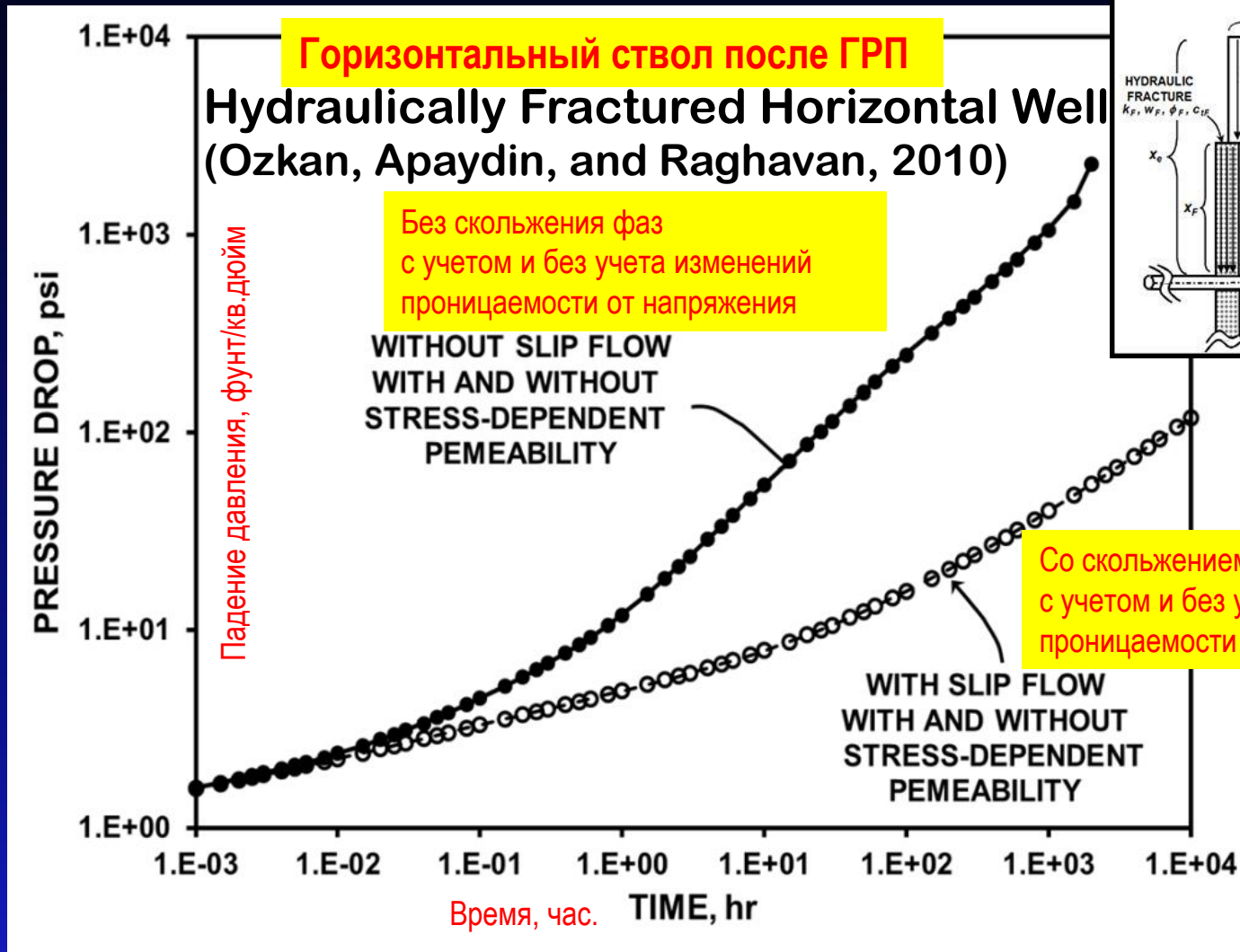
Pressure-Dependent Natural-Fracture Permeability

Зависимость проницаемости естественных трещин от давления



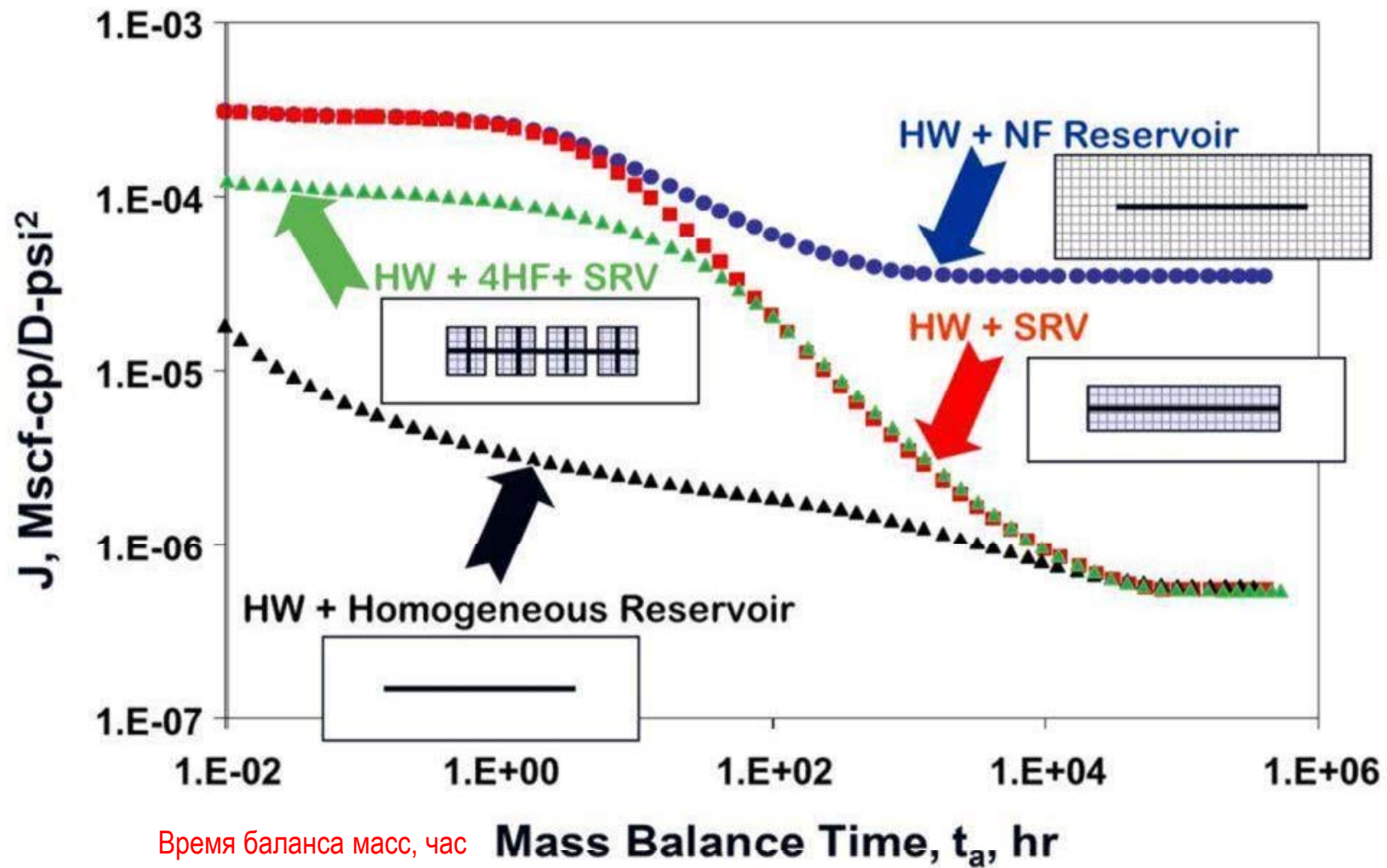
Dual-Mechanism, Dual-Porosity, Dual-Fractured Reservoir Model

Двойной механизм, двойная пористость, модель пласта с двойной трещиноватостью



What's the role of Hydraulic Fractures?

Какую роль играют трещины ГРП?



Effect of Matrix Permeability

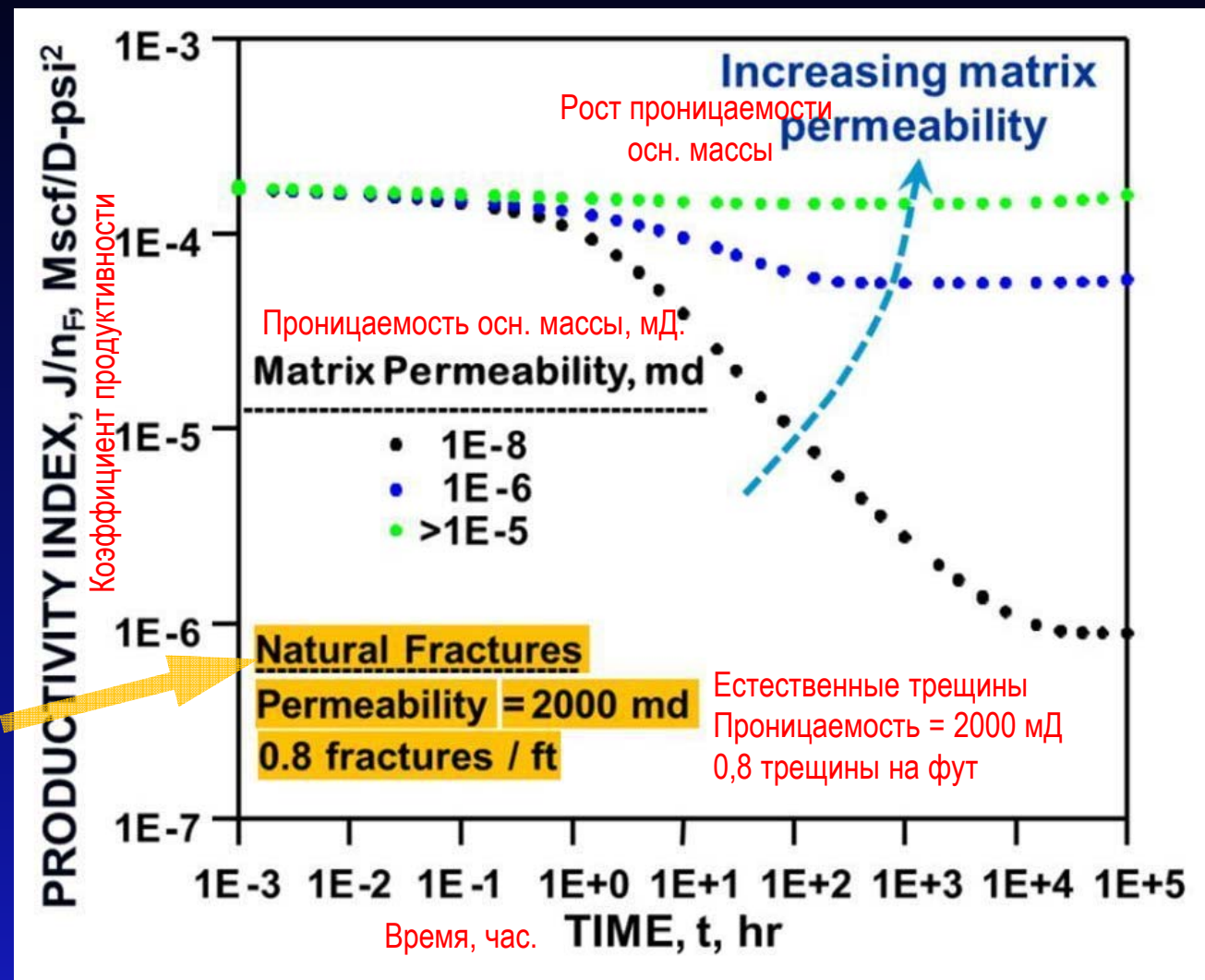
Влияние проницаемости основной массы породы

Productivity increases with increasing matrix permeability for $k_m \leq 10^{-5}$

Продуктивность возрастает по мере повышения проницаемости основной массы до $K_{пр} \leq 10^{-5}$

When flow capacity of natural fractures is reached, no additional productivity is possible

Дальнейшее повышение производительности невозможно после достижения фильтрационной емкости пласта, обеспеченной естественной трещиноватостью,



Effect of Natural Fracture Permeability

Влияние проницаемости естественных трещин

No difference in productivity with increasing natural fracture permeability

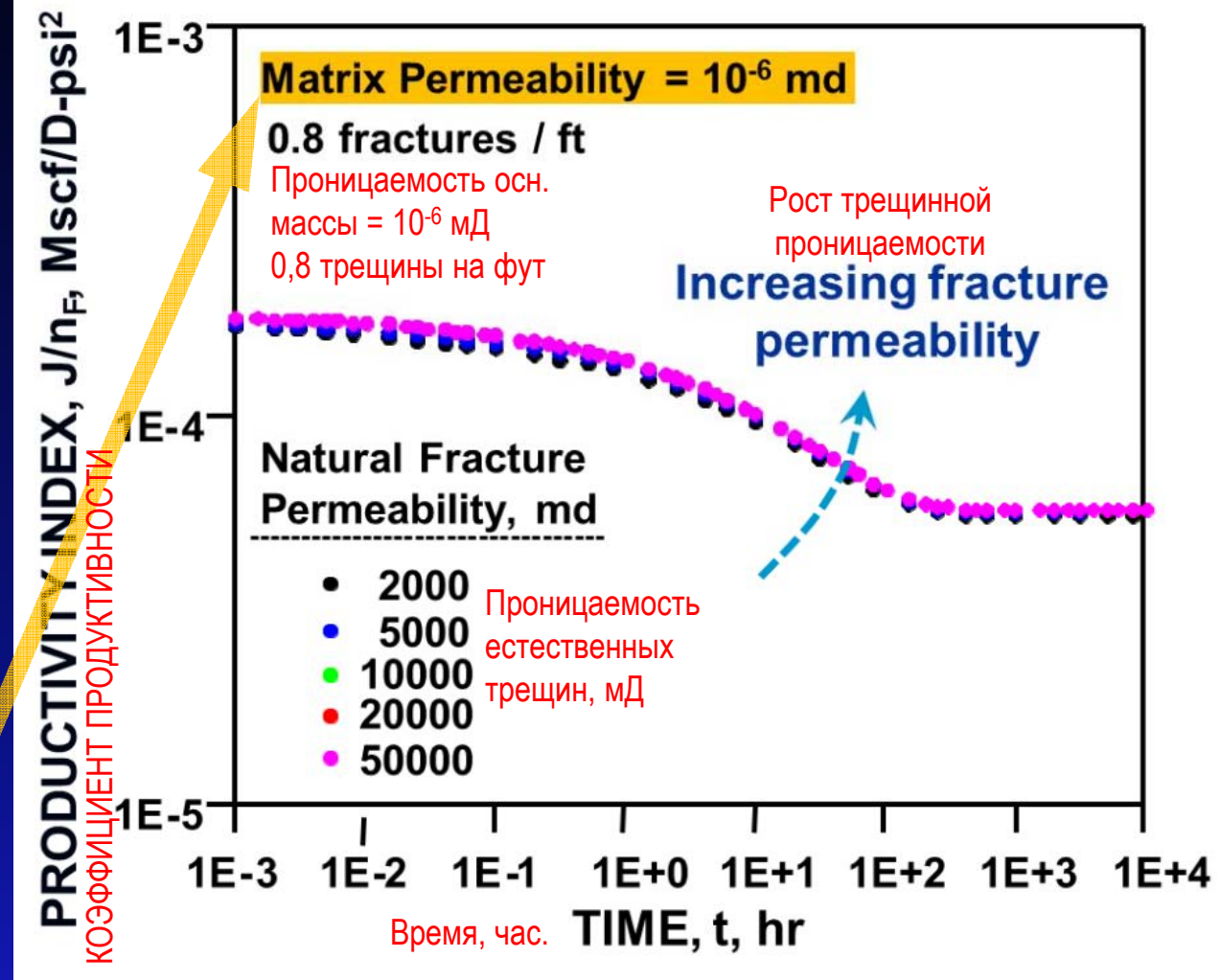
Повышение проницаемости естественных трещин не влияет на продуктивность

Natural fracture permeability has little effect on productivity

Повышение проницаемости естественных трещин мало влияет на продуктивность

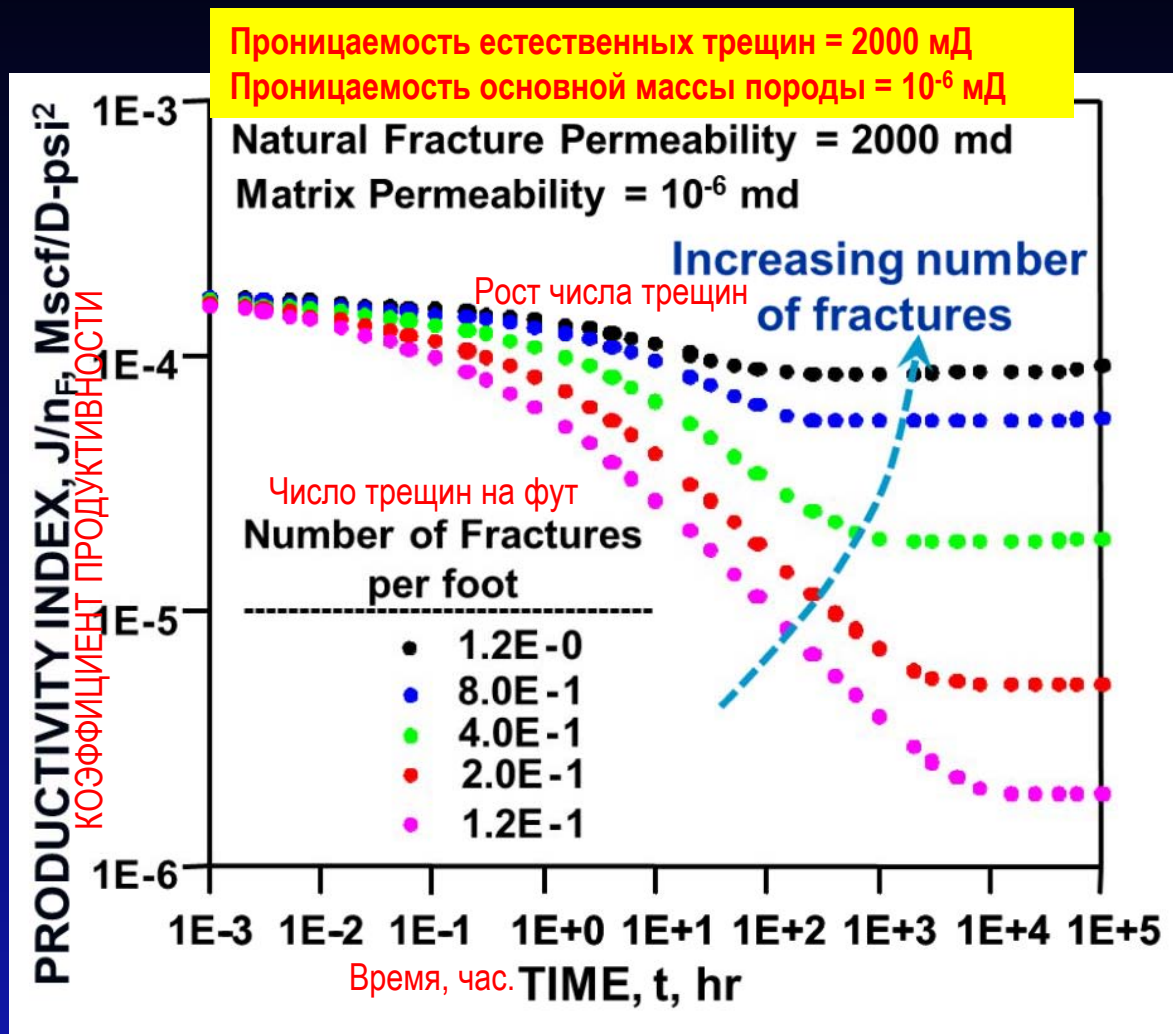
Flow capacity of the matrix is the limiting factor

Ограничивающим фактором является фильтрационная емкость основной массы породы



Effect of Natural Fracture Density

Влияние плотности естественной трещиноватости



Natural fracture density has significant effect on flow capacity of matrix.

Плотность естественной трещиноватости имеет большое влияние на фильтрационную емкость пласта

Greater surface area for flow allows for a greater volume of fluid to be moved

Большая площадь суммарного сечения трещин обеспечивает больший объем фильтрующегося флюида

Effect of Hydraulic Fracture Conductivity

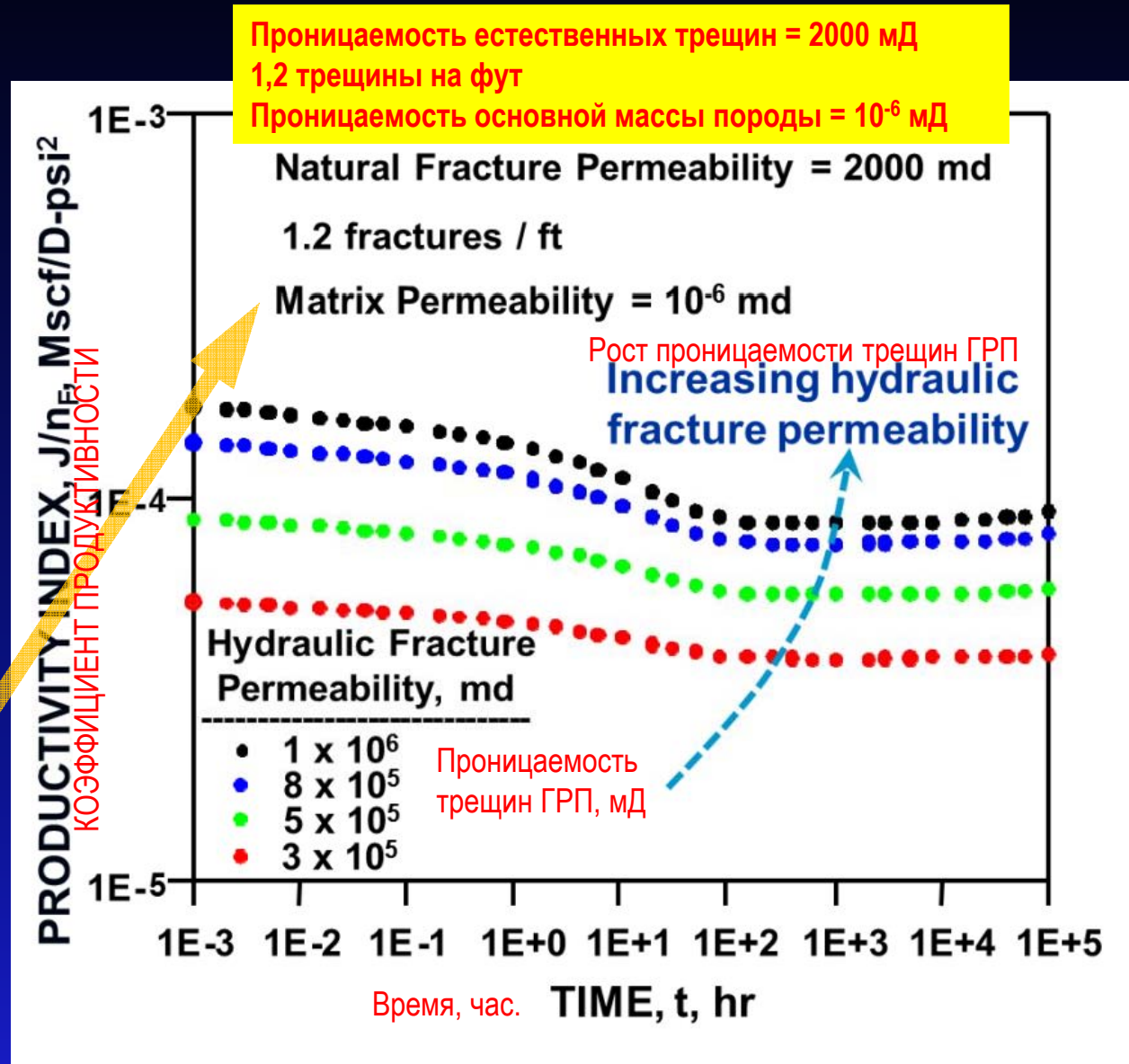
Влияние проводимости трещин ГРП

Incremental productivity decreases as conductivity increases.

Дополнительная продуктивность снижается по мере возрастания проводимости

Volume of fluid available to flow is limiting factor

Ограничивающим фактором является объем флюида, вовлеченного в фильтрацию



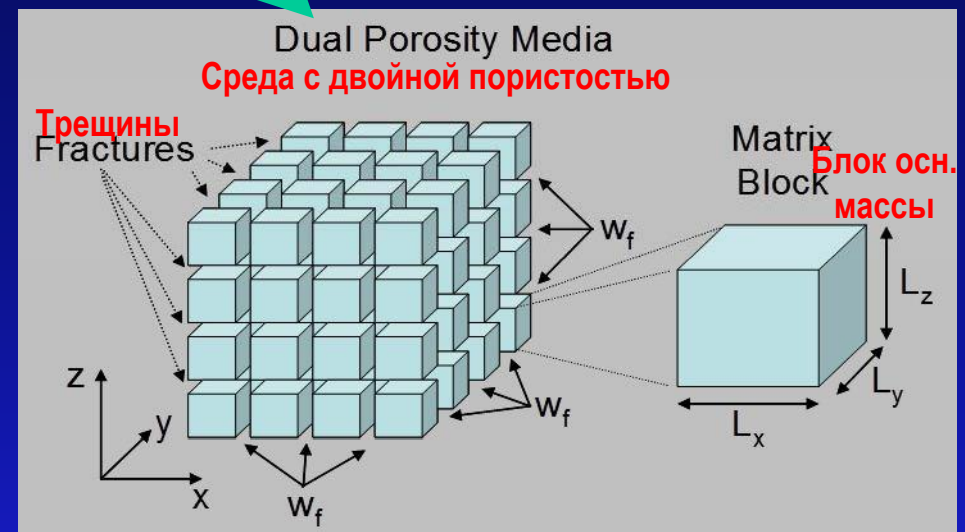
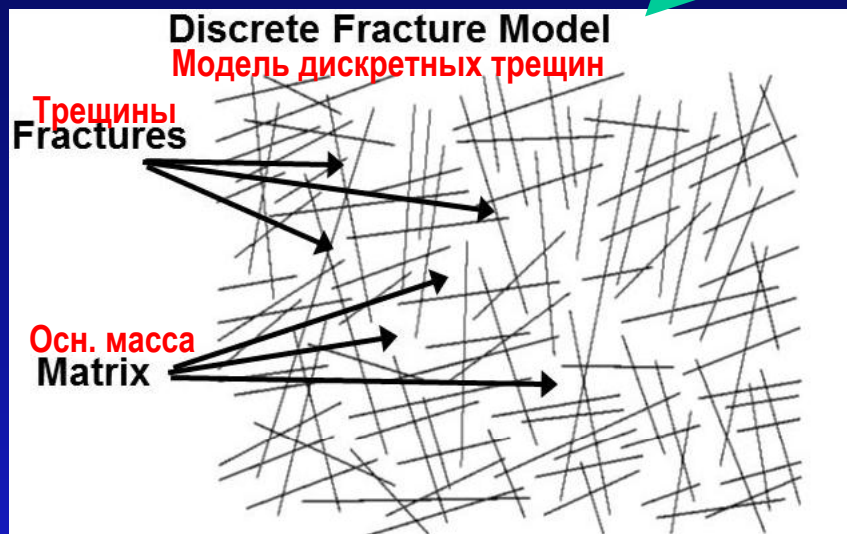
Modeling Flow in Fractured Shale

Моделирование фильтрации в трещиноватом сланце

Modeling Fractures as a Network of Natural Fractures

Моделирование системы естественных трещин

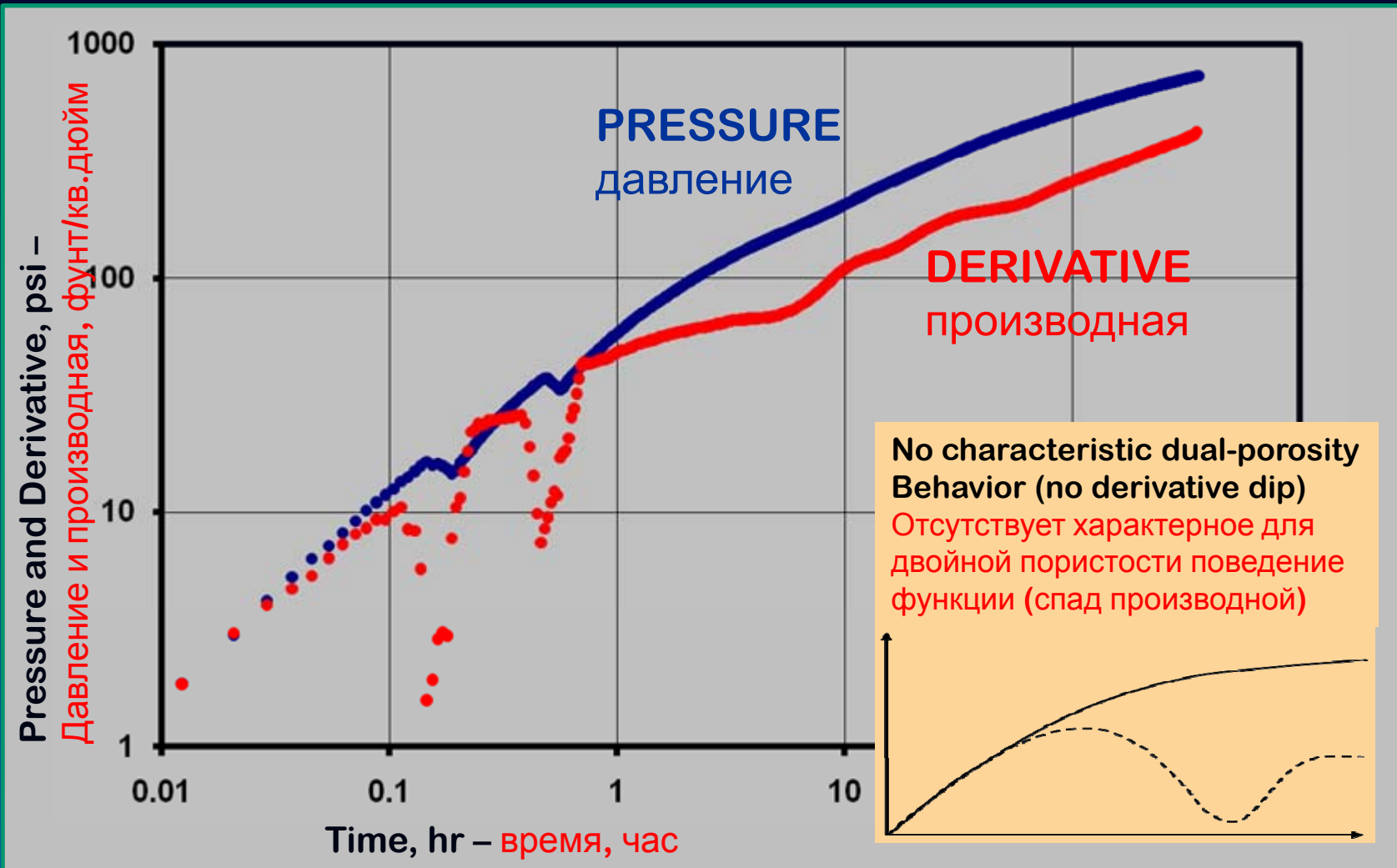
Physical System – Физическая система



Missing something? – Чего-то не хватает?

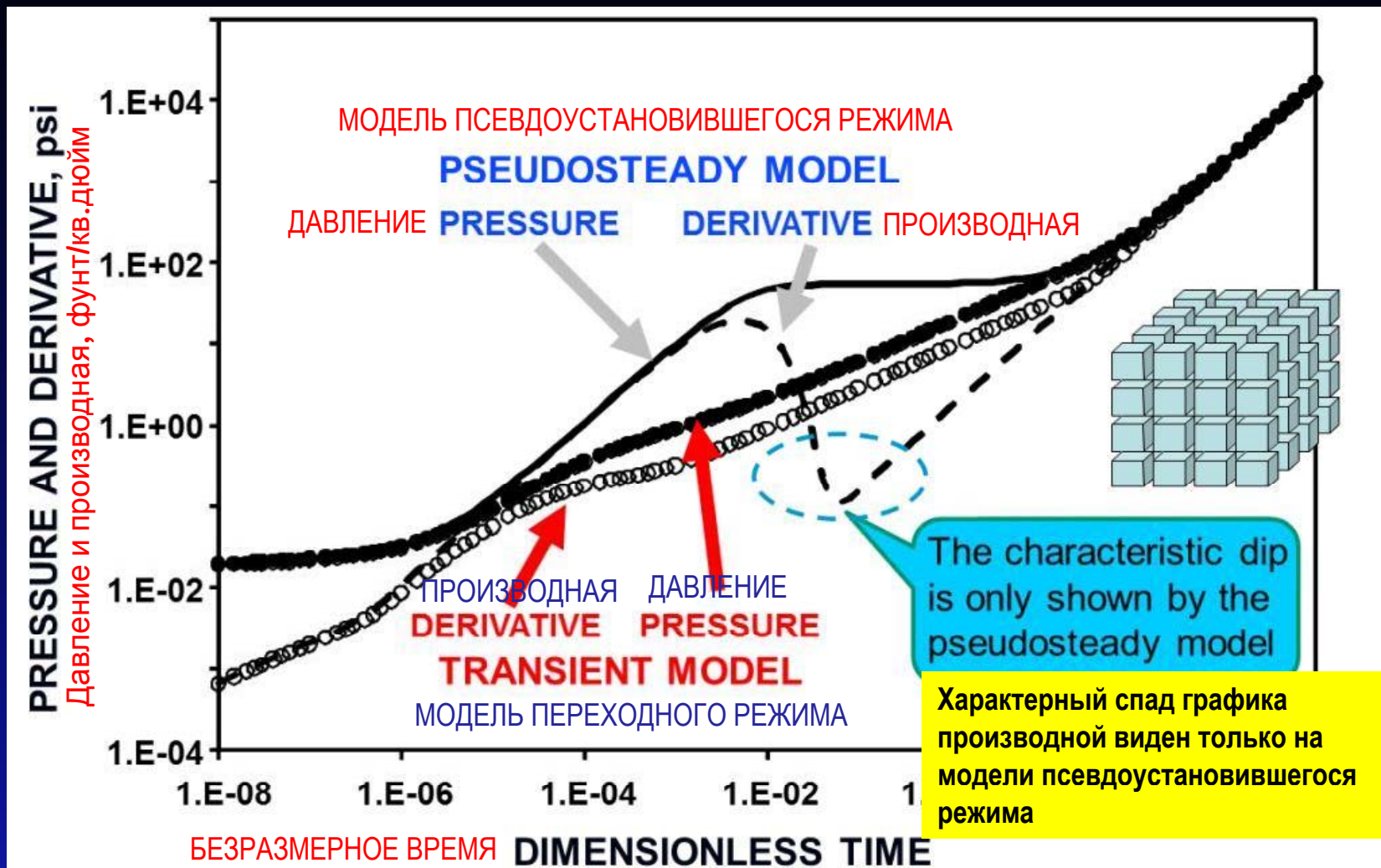
Where are the reservoir fractures? – Где же пластовые трещины?

Pressure Buildup Test in Shale Reservoir (Field Data) – Анализ восстановления давления в пласте глинистых сланцев (промысловые данные)



Consequence of Using Conventional Tools

Следствие использования традиционных методов



Transient dual-porosity model is more appropriate in shale – для сланцев лучше подходит модель с двойной пористостью и неустановившимся режимом фильтрации

(What is in your reservoir simulator? – Каким симулятором вы пользуетесь?) 26

Conclusions - Выводы

Our potential to recover gas from shale has been increasing due to

- . new technologies to fracture horizontal wells
- . better understanding of flow and production mechanisms

Возможность добычи газа из глинистых сланцев повысилась вследствие

- применения новых технологий ГРП в горизонтальных скважинах
- лучшего изучения фильтрации и механизмов извлечения нефти

Marginal economics of shale-gas projects requires more improvements in

- . characterization and modeling capabilities
- . analysis and prediction tools and techniques

Низкие экономические показатели разработки газовых залежей в глинистых пластах требуют следующего:

- повышения качества исследования и моделирования пласта
- совершенствования методик анализа и прогнозирования