

XII научно-практическая конференция МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Numerical Simulation of Reservoir with Highly Conductive Faults

Численное моделирование залежей с
высокопроводящими разломами

Газпромнефть Бадра Б.В.
Н.А. Шевко, к.т.н.
Санкт-Петербург
23-25 апреля 2019

Цель работы

- Совершенствования традиционных подходов прогнозирования поведения карбонатных залежей, осложненных тектоническими нарушениями и наличием зон трещиноватости, за счет моделирования фильтрационных потоков в высокопроводящих разломах.
- Оптимизация численного алгоритма решения системы уравнений фильтрации с учетом нерегулярного расположения разломов.
- Оценка эффективности реализации метода на полномасштабной гидродинамической модели «черной нефти» одного из месторождений Ирака.

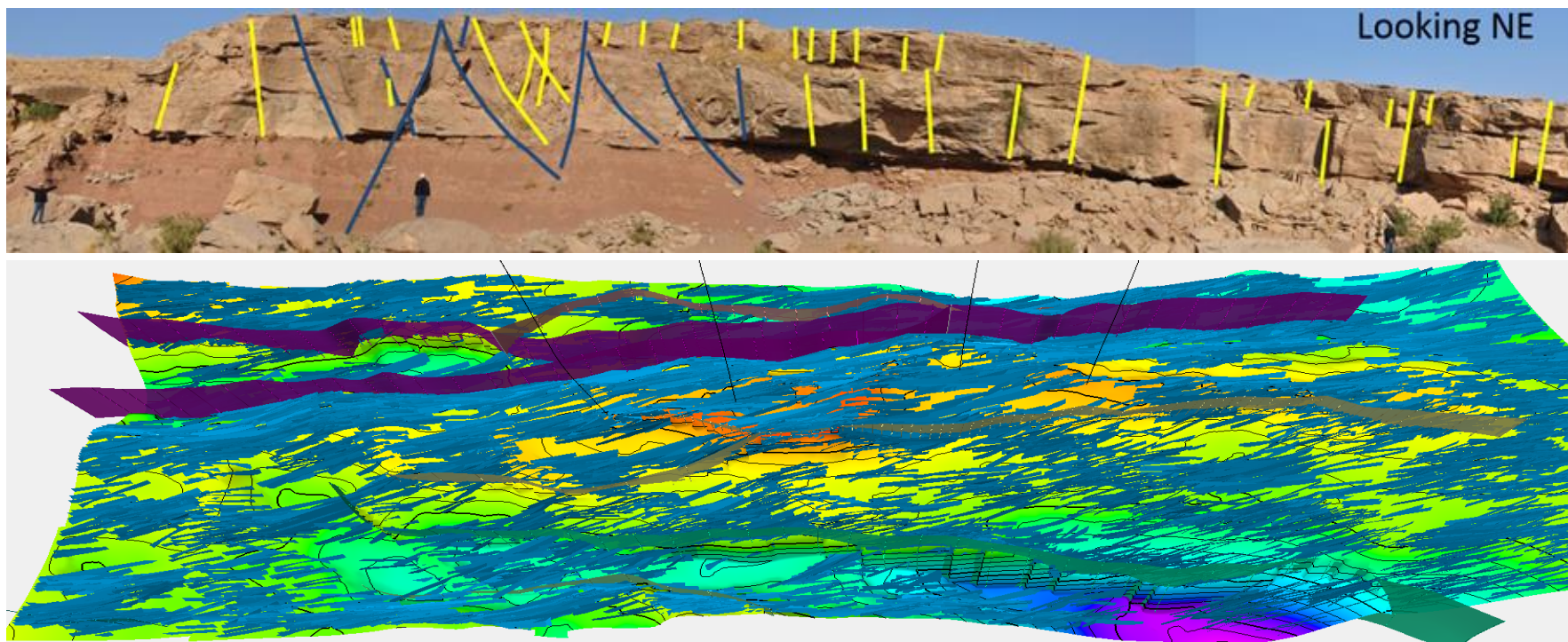


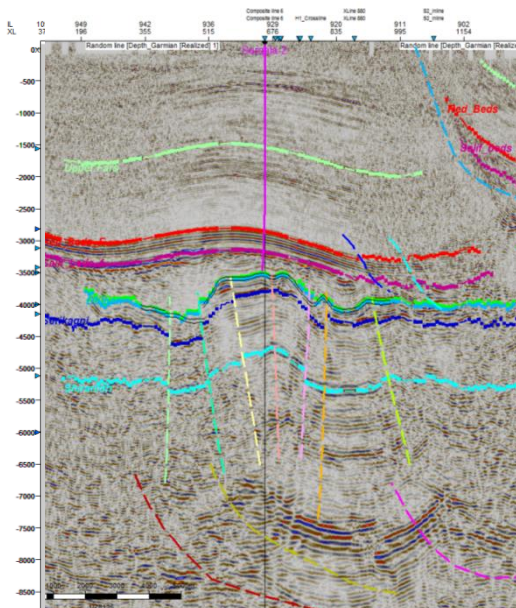
Рис. Разломы и дискретная сеть трещин, месторождение нефти, Ирак

Способы изучения разломов и трещин

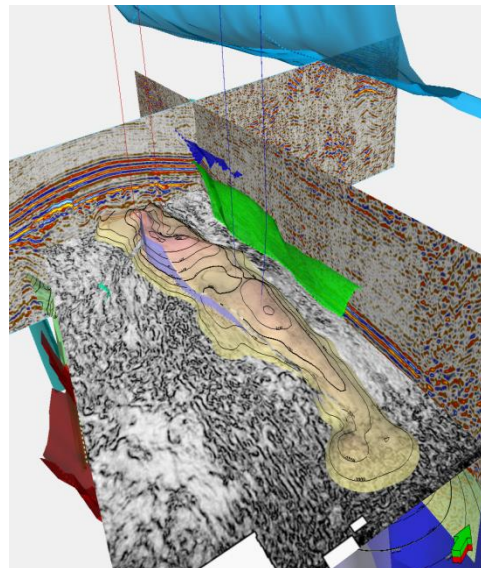
В зависимости от масштаба разломы и трещины условно разделяют на следующие группы:

1. Крупные разломы, линеаменты – выделяются по сейсмическим данным, хорошо видны в волновом поле
2. Средние разломы, зоны трещиноватости – выделяются по сейсмическим атрибутам (когерентность – ant-tracking, variance, amplitude contrast, curvature; изучение анизотропии и азимутальный скоростной анализ), не всегда видны на сейсмических разрезах амплитуд
3. Микро-трещины – выделяются по скв.данным (FMI, акустики), кернавым данным (описание, шлифы, томография)

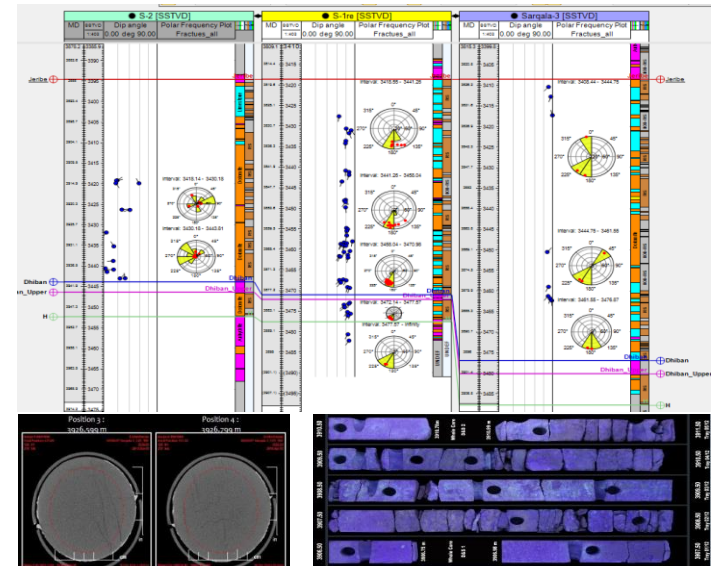
Выделение крупных разломов по 3Д сейсмическим данным



Выделение зон трещиноватости по сейсмическим атрибутам



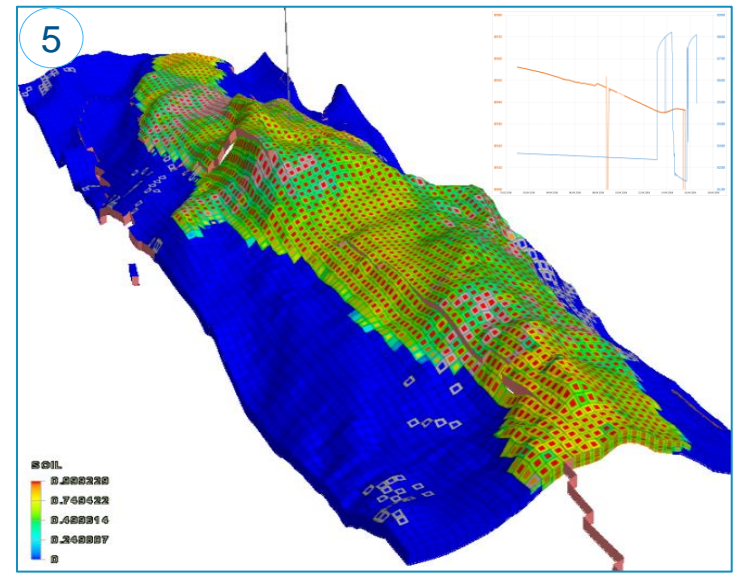
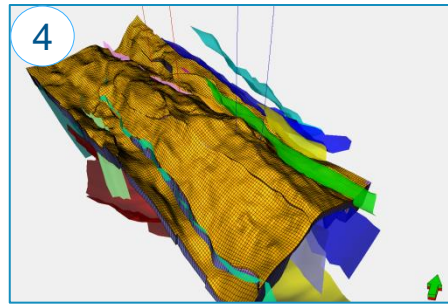
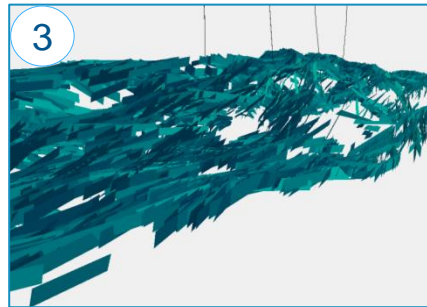
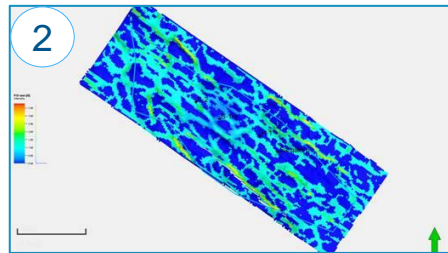
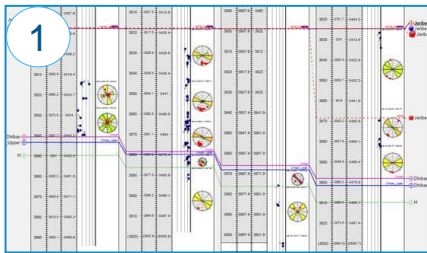
Микротрещиноватость по скважинным и кернавым данным



Современные особенности моделирования разломов и трещин

Моделирование системы трещин и разломов выполняется совместно в едином графе построений:

1. Интерпретация FMI, выделение разломов и трещин, расчет интенсивности трещин и плотности трещин по стволу скважины
2. Моделирование куба плотности трещин с использованием сейсмических атрибутов
3. Задание параметров трещин, включая геометрические размеры, максимальную длину трещин IFN, раскрытость (апертуру), азимуты и наклон. Выбор алгоритма и моделирование системы трещин
4. Апскейлинг на грид и расчет свойств двойной среды (пористость, сигма, проницаемость)
5. Настройка параметров двойной среды на историю разработки (прорывы воды, интерференцию, ГДИ)



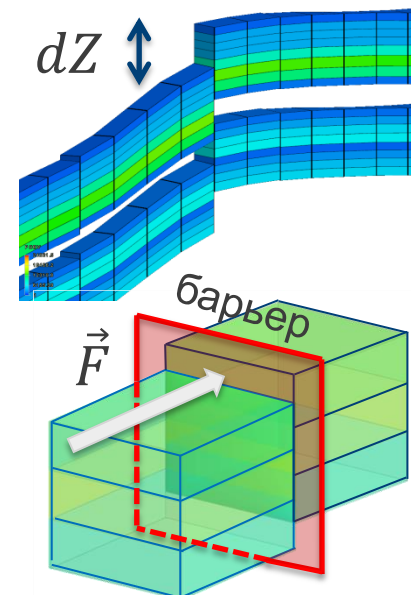
Адресное моделирование разломов и трещин выполняется на этапе создания моделей дискретной сети трещин (DFN), однако в силу трудоемкости далее формируется и используется в ГДМ только обобщенная модель двойной пористости двойной проницаемости (DPDP).

Отдельное, адресное моделирование разломов в рамках коммерческих симуляторов не получило широкого распространения, возможно, в силу не высокой эффективности численных алгоритмов.

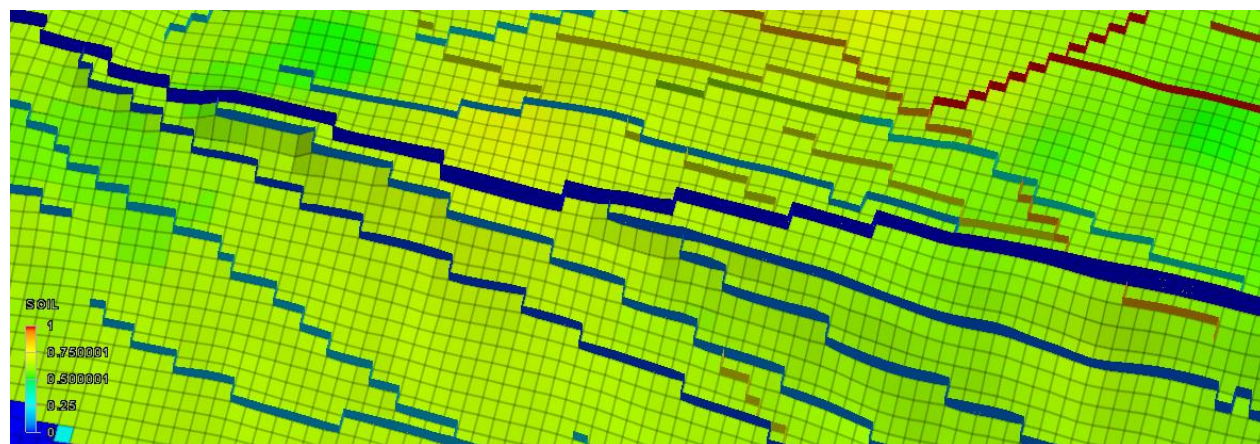
Традиционные особенности ГД моделирования разломов

Несмотря на разнообразие типов разломов и способов их изучения традиционные **подходы моделирования разломов** следующие:

- **Геометрия разломов** – учитывается при структурном моделировании сетки, ограничивается использованием регулярных сеток с угловой геометрией (corner-point grid), описываемых своими координатными линиями ключевые разломы, остальные – описаны зигзагообразным способом. Структура сетки смещается.
- **Динамические свойства** – ограничиваются тем, что разломы воспринимаются как барьеры, ограничивающие переток (поперек разлома) между соседними ячейками. В случае полной проводимости (отсутствие барьера) моделирование разломов не требуется, поскольку процедура расчета проводимости между ячейками, находящимися по разные стороны от разлома, выполняется автоматически.



Исходные данные, внешний вид множественных разломов



FAULTS	Номер ячейки и грани						
--NAME	IX1	IX2	IY1	IY2	IZ1	IZ2	FACE
'FAULT1'	166	166	46	46	1	200	'Y+' /
'FAULT1'	165	165	46	46	1	200	'Y+' /
'FAULT1'	164	164	46	46	1	200	'Y+' /
'FAULT1'	163	163	46	46	1	200	'Y+' /
'FAULT2'	166	166	56	56	1	200	'Y+' /
'FAULT2'	165	165	56	56	1	200	'Y+' /
'FAULT2'	164	164	56	56	1	200	'X+' /
'FAULT2'	164	164	55	55	1	200	'Y+' /
'FAULT6'	166	166	65	65	1	200	'Y+' /
'FAULT6'	165	165	65	65	1	200	'X+' /
'FAULT6'	165	165	64	64	1	200	'Y+' /
'FAULT6'	164	164	64	64	1	200	'Y+' /

MULTFLT	
'FAULT1'	0.4 /
'FAULT2'	0 /
'FAULT6'	1 /

Предлагаемый вариант моделирования разломов

Высокопроводящие разломы и ближайшие к ним зоны разуплотнения коллектора могут проводить флюид не только поперек, но и **вдоль своего простираия**, связывая различные участки залежи и оказывая существенное влияние на динамику разработки и выработку запасов.

Предлагается: моделировать течения вдоль разломов, при этом:

(**А**) использовать стандартный способ дискретизации разломов вдоль простираия – через геометрию corner-point; (**Б**) выполнять независимую от сетки дискретизацию разломов по Z; (**В**) выбрать схему подключения разлома к ячейкам сетки через NNC с учетом типа соединения: а) изолированный, б) проводимый поперек, в) проводимый вдоль; (**Г**) Стандартно рассчитать проводимости и учесть течения вдоль разломов в соответствии с физикой процессов в породе.

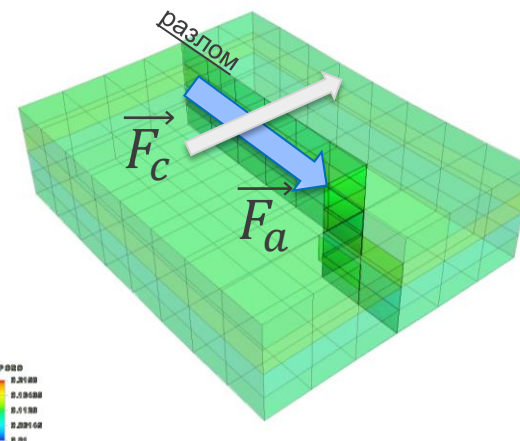


Рис. А. Дискретизация разломов вдоль простираия

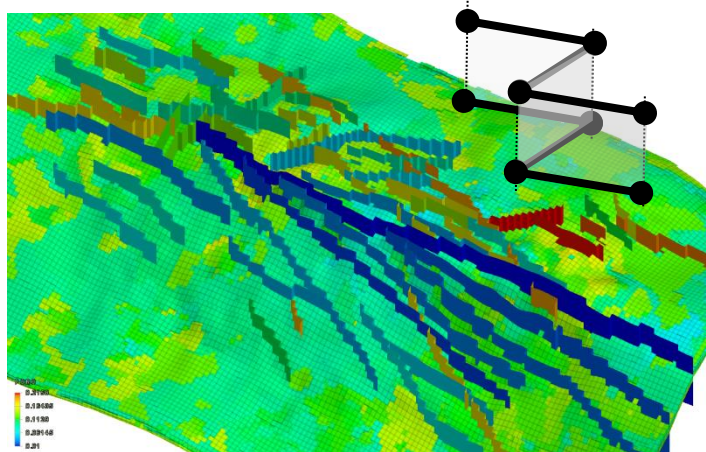


Рис. Б

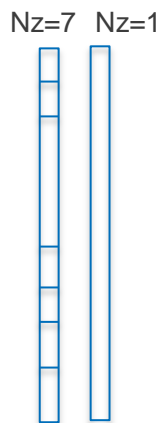


Рис. В

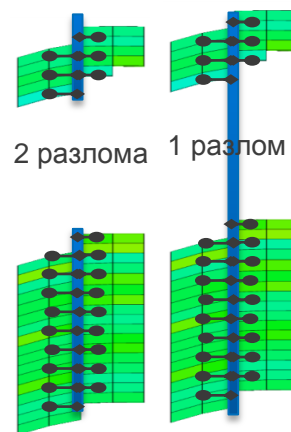


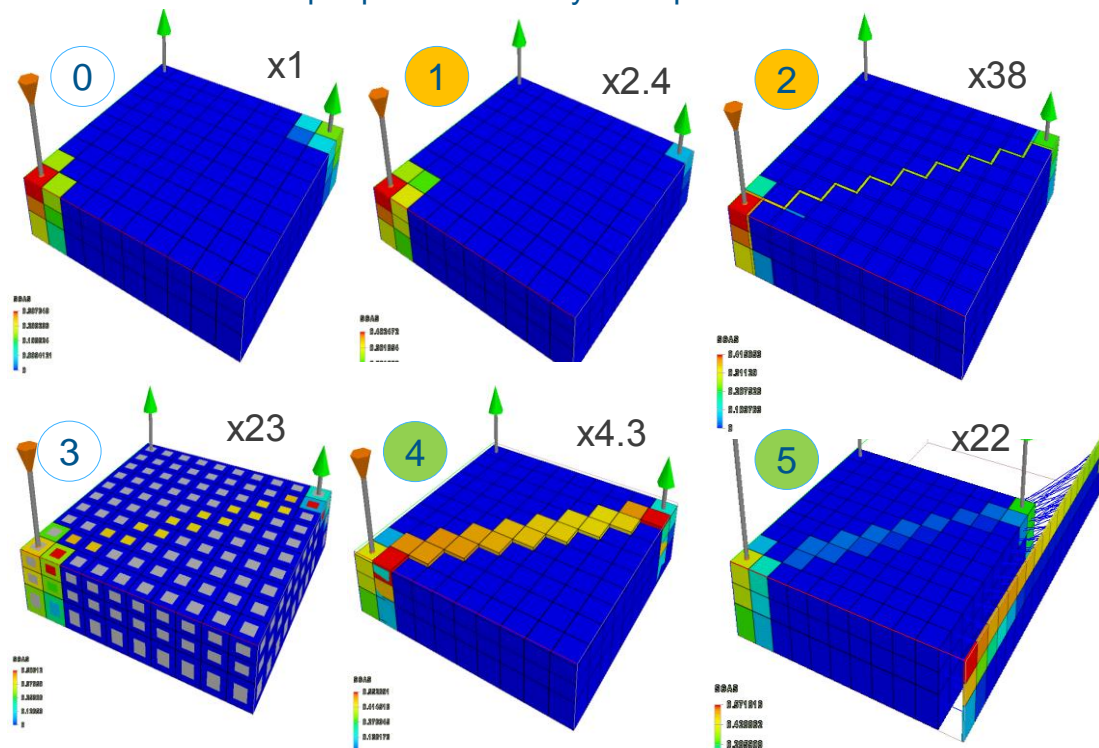
Рис. Г. Расчет проводимостей по разлому и с ячейками – стандартным способом

$$T_{i,j} = \frac{C_{darcy} MULTFLT_i}{T_i^{-1} + T_j^{-1}}$$

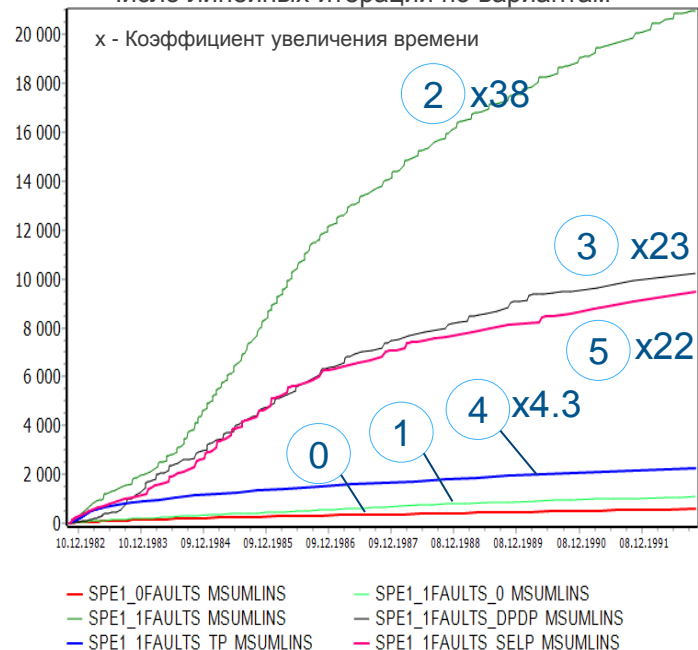
Доступные варианты реализации

Как можно смоделировать разлом используя имеющиеся инструменты (примеры на базе SPE1*):

0. Исходная модель без разломов – для сравнения;
1. Сложение проводимостей – большие расхождения результатов;
2. Мелкая сетка – много дополнительных ячеек, самый медленный;
3. Двойная среда (разломы во второй среде) – уже лучше;
4. Дополнительная среда с NNC – перспективно и логично:
 - А – порядок нумерации по сильным связям (по Z),
 - Б – по связям 2 приоритета – это лучшие решения.



Число линейных итераций по вариантам



Учитывая результаты тестов (число линейных операций как аналог времени), можно сделать вывод, что предпочтительнее моделировать разломы – отдельно.

*В тест SPE1 (закачка газа в нефтенас. пласт) – добавлена 3-я скважина

Совершенствование численной схемы расчета

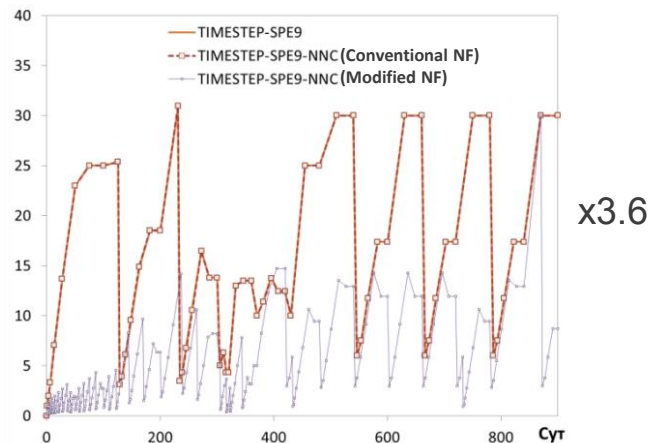
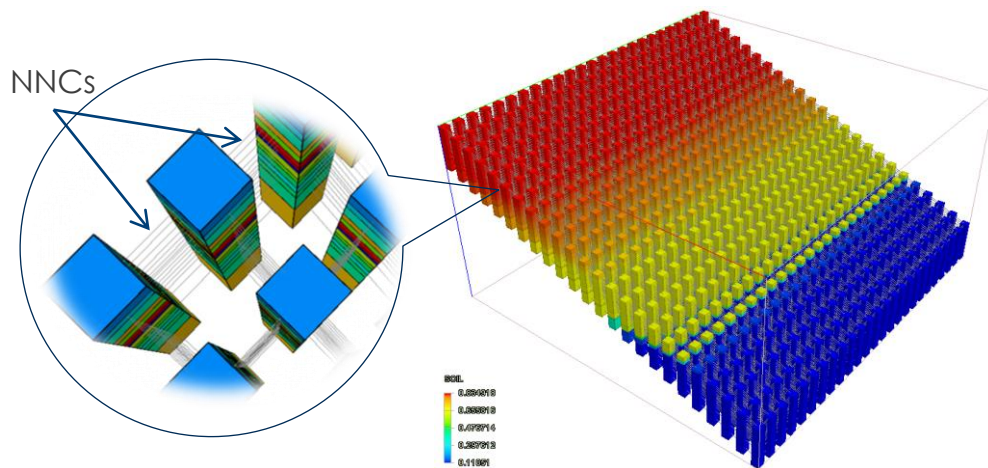
По причине появления множества NNC потоков, приводящих к нарушению регулярной структуры матрицы системы уравнений, возникают проблемы со сходимостью численных схем и увеличением времени расчетов. Используются несколько приемов улучшения решения матриц с нерегулярной структурой.

1) Модификация Nested Factorization для использования множества несоседних связей

В полном виде учтены A ($5 \times 4 \times 3$) с неактивными ячейками и NNC выглядит так



Тест на базе SPE9, где все регулярные соединения заменены на NNC



Вывод: Модифицированный NF показал высокую численную эффективность при большом числе NNC по сравнению со стандартной версией NF (63 vs. 228 шагов – см. график)

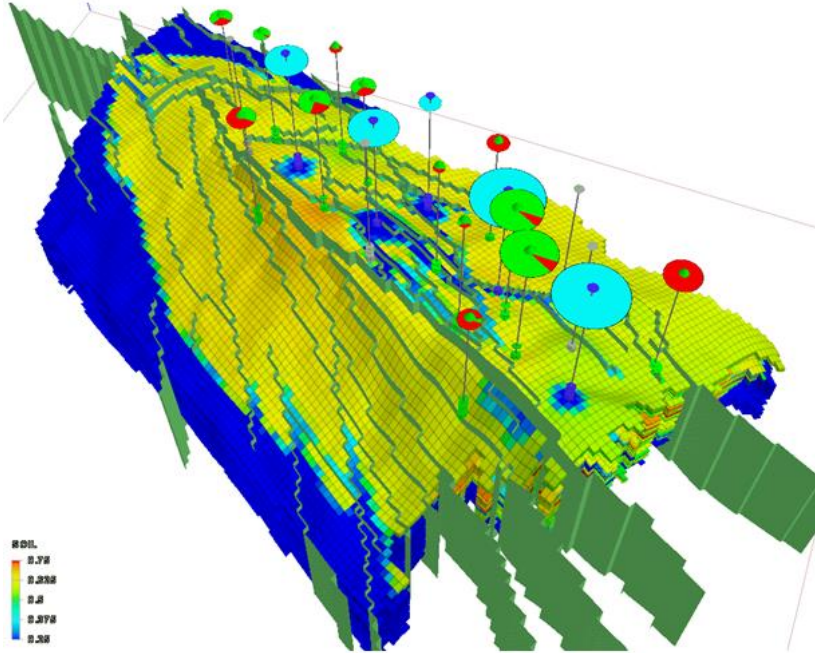
Выполнение полномасштабных расчетов – сравнение эффективности численных схем

Описание модели:

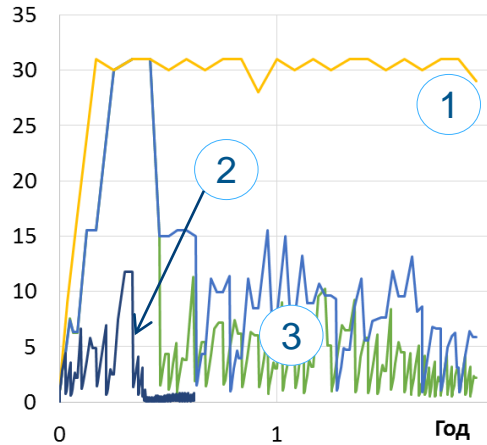
- **Тип:** трехфазная - нефть, раств.газ, вода
- **Размерность** 167 x 99 x 200, акт.ячеек 1.5 млн.
- **Число скважин:** 22 (17 доб.+5 нагн.)
- **Продолжительность:** 25 лет

Опции/Особенность:

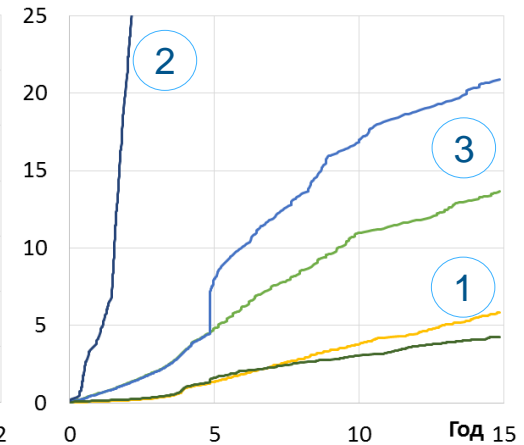
- Карбонатный коллектор (8 пластов)
- 49 разломов с разной проводимостью, 300 тыс. NNCs
- Модель законтурной зоны (Fetkovich)
- 22 VPF-таблиц для доб. и нагн. скважин
- Масштабирование фазовых проницаемостей



Шаг, сут



CPU, час



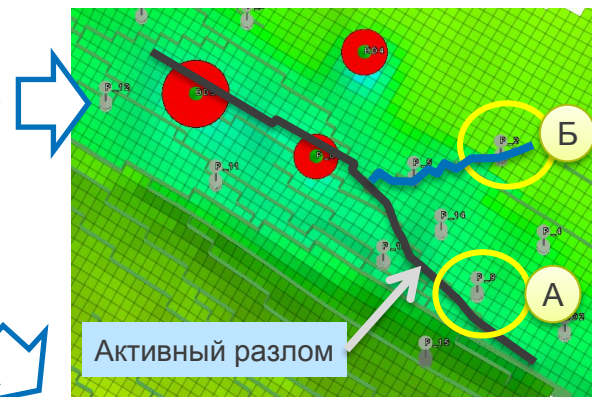
Алгоритм / ТCPU, час	Без учета разломов		С учетом разломов	
	Упр.Реж.	ППД	Упр.Реж.	ППД
Стандартный	4.3	5.8	67 (x15)	125+(x22)
С оптимизацией	4.6	5.9	13 (x3)	22 (x4)

Вывод:

- Сроки моделирования на полномасштабной ГДМ сокращены в 5 раз, что позволяет выполнять многовариантные расчеты в разумные сроки.
- В отдельных случаях параметры разломов существенно увеличивают время расчета, что требует дополнительных подходов.

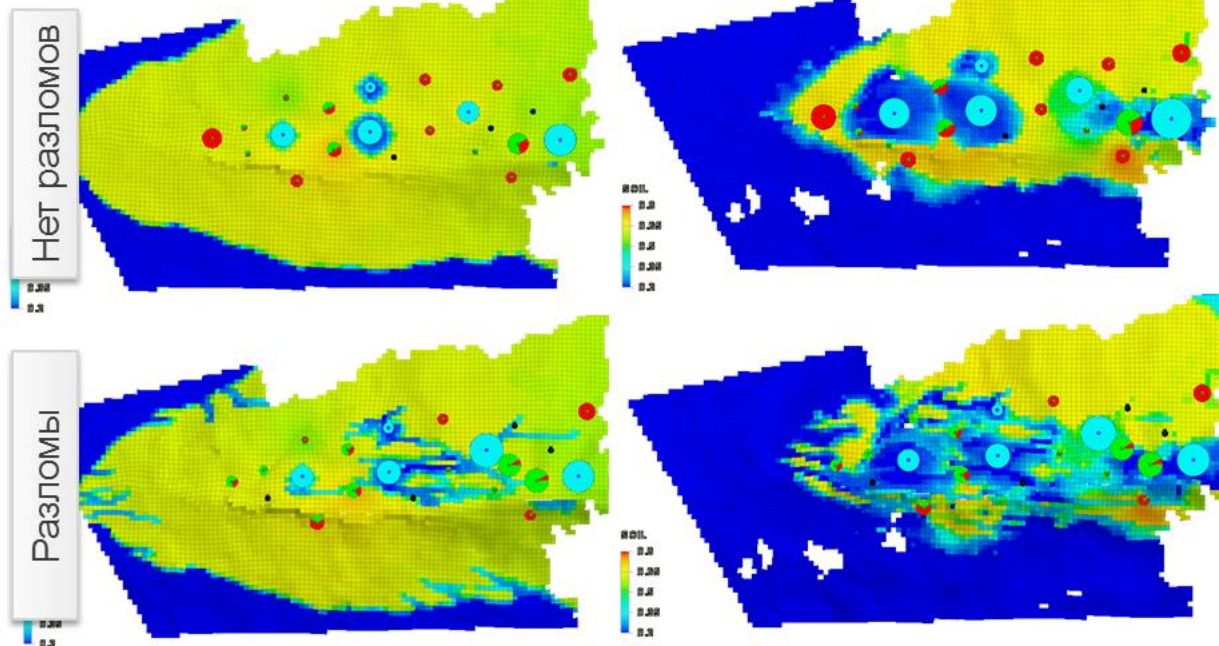
Выполнение полномасштабных расчетов – практические результаты моделирования

- 1. Адаптации залежи с активными разломами** – позволила учесть Рпл начальные (А) и интерференцию соседних скважин при запуске новых (Б), как результат оценена проводимость разломов, определены непроницаемые разломы и разломы, не оказывающие влияния на разработку.
- 2. Прогноз показателей разработки при разных параметрах разломов** (полу-изолированные блоки, отсутствие разломов и высокопроницаемые разломы) – показал увеличенные риски снижения эффективности ППД для случая высоких продуктивных характеристик разломов, приводящих к опережающему прорыву воды и отключению скважин.

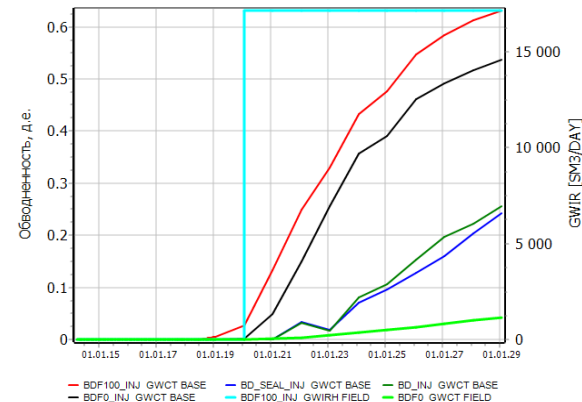


Пласт Mauddud-B (низкопроницаемый)

Пласт Mauddud-D (высокопроницаемый)



Динамика обводнения по вариантам



КИН, д.е.	УР	ППД	Δ%
Нет разломов	0,104	0,118	+14
Частично-проводящие	0,111	0,110	+0
Высоко-проводящие	0,120	0,111	-7

Выводы и перспективы использования

1. Геометрия высокопроводящих разломов может быть определена по данным 3Д сейсмики, а их динамические характеристики – по данным истории разработки и ГДИС
2. Предложенный подход адресного фильтрационного моделирования проводящих разломов является перспективным направлением улучшения качества фильтрационного моделирования и прогнозирования механизма вытеснения углеводородов в залежах, осложненных высокопроводящими тектоническими нарушениями
3. Для улучшения скорости счета во всем диапазоне параметров разломов возможно применение и других оптимизаций. Например, расщепление задачи во времени (решение системы разломов с более мелкими шагами по времени).

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!