

# XV научно-практическая конференция МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

г. Москва, 25-26 апреля 2023

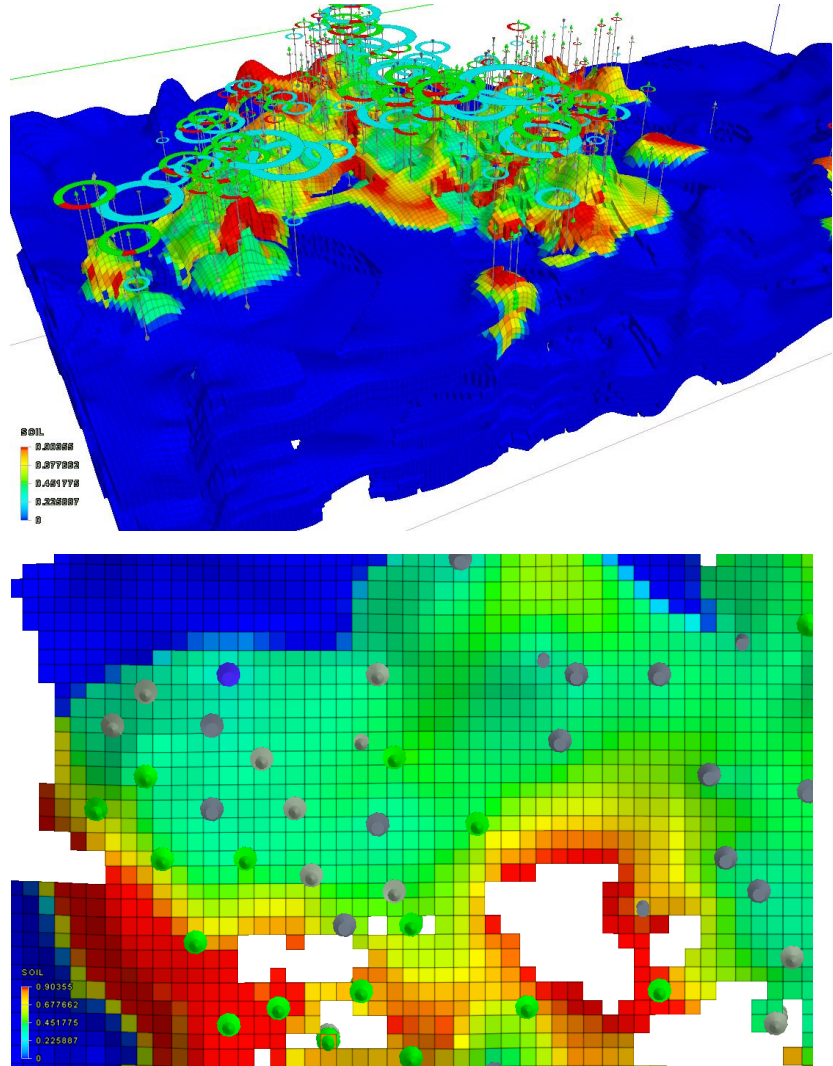
**Гибридный гидродинамический симулятор на  
неструктурированной сетке для решения  
оперативных задач разработки**

**A Hybrid Numerical Simulator on an Unstructured Grid  
for Solving Routine Reservoir Problems**

Газпромнефть Бадра Б.В., Багдад

Н.А. Шевко, Заместитель генерального  
директора по геологии и разработке,  
Главный геолог, к.т.н.

# Описание проблемы: «неоперативные» полномасштабные модели



Для оперативных задач разработки традиционные полномасштабные модели залежей часто игнорируются или используются в ограниченном варианте: карта остаточных запасов, текущие пластовые давления, долгосрочное прогнозирование. Приходится иметь набор моделей для решения спектра производственных задач.

## Недостатки, ограничивающие применение:

- Большая размерность (тяжёлые)
- Грубые размеры ячеек для локальных задач (запасы, ГТМ и ГДИ)
- Длительный процесс обновления (ГМ, ГДМ, переадаптация)
- Невозможность быстро поменять детализацию с учетом всех исходных геолого-геофизических данных
- Ограничения на геометрию ячеек

**Задача:** создавать модели «на лету», быстро ее адаптировать, оценить эффективность бурения и ГТМ на отдельной скважине (переводы, углубления), оптимизацию закачки, интерпретацию ГДИ.

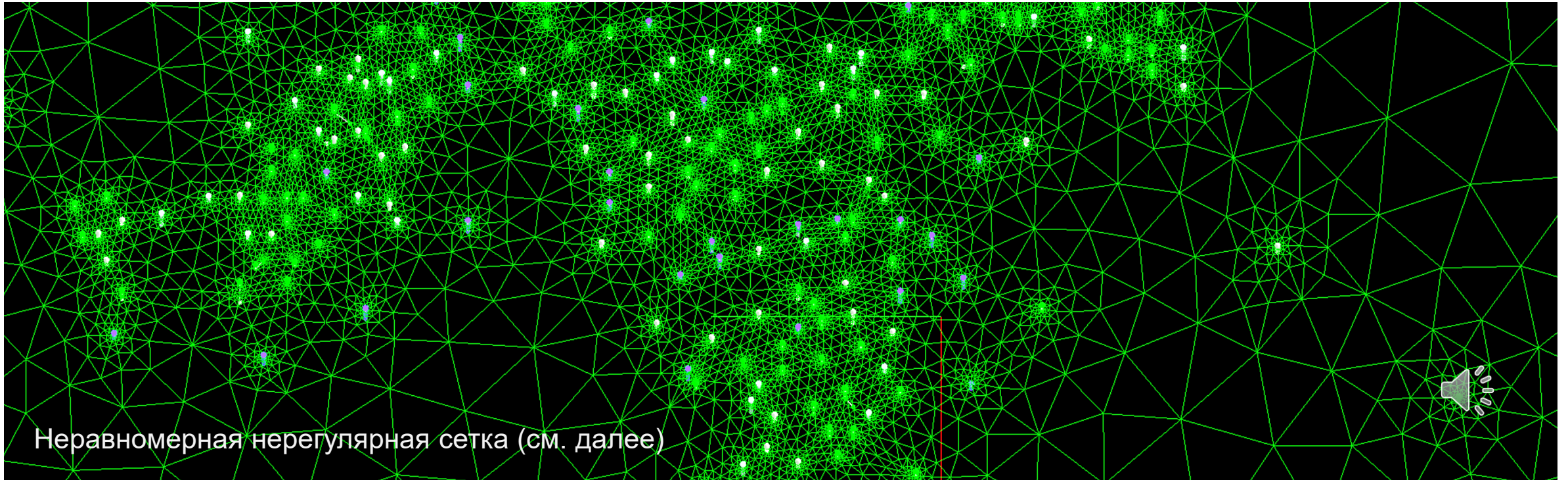
**Проблема:** ограниченность использования готовых моделей для оперативных задач разработки в требуемые бизнесом сроки с приемлемой точностью.



# Цель и задачи

**Цель:** Расширение возможностей фильтрационного моделирования для решения оперативных задач разработки: оценка энергетического состояния, распределение остаточных запасов, оптимизация закачки, мониторинг разработки и подбор геолого-технических мероприятий (ГТМ).

**Задачи:** 1) Поиск подходов описания геологических объектов с минимальным числом дескрипторов.  
2) Выбор эффективных численных методов для нерегулярных дискретизаций объектов моделирования.  
3) Реализация алгоритмов и проверка расчетного модуля на реальных задачах.



# Существующие решения

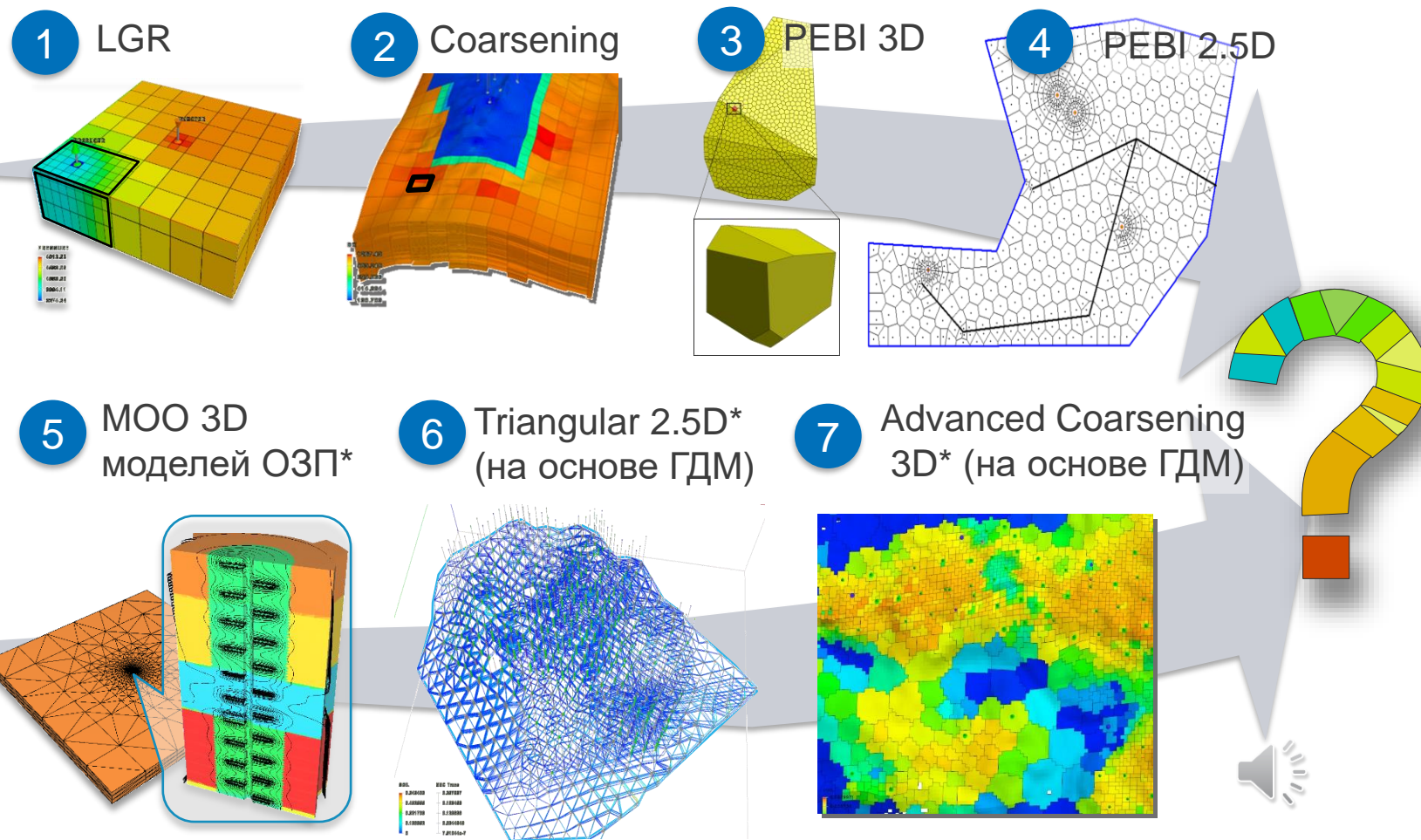
## Процессы требующие улучшений

1. Этапы построения и использования моделей: ГМ – апскейлинг – ГДМ – адаптация – дизайн ГТМ – измельчение сетки – оценка прироста.
2. Дискретизация геологической модели – изначально фиксирует геометрию ячеек и размерности модели и влияет на точность последующих построений и расчетов.

**ВЫВОДЫ:** Опции стандартных симуляторов (1-4) не позволяют решить поставленную задачу. Имеется успешный опыт использования нерегулярных сеток (5-7).

**Нужны альтернативные подходы «сборки» ГДМ с гибкой детализацией сетки!**

## Готовые решения



\* НХ ММ 2019, Н.А. Шевко

# Идея создания оперативных моделей и методы решения

---

**Цель** создания оперативных моделей – быстро и точно решать задачи разработки в режиме реального времени

**Идея решения** – описание геологического строения и фильтрационных свойств залежи ограниченным количеством геологических объектов (пласт, пропласток, разлом, трещина), геометрия, свойства и связи которых заданы минимальным числом дескрипторов и функциональных связей, пропорциональных количеству исходных данных и «источников» информации.

1. Геологические объекты – набор фильтрационных объектов, связанных между собой.
2. Использование «объектной, каркасной сетки», степень детализации которой определяется только набором исходных данных, сложностью геометрии и неоднородностью, полученной по прямым данным.
3. Детализация объектов откладывается до момента применения конкретной задачи фильтрации.

## Общие подходы и методы решения

1. **Сокращение стандартных этапов** построения и эксплуатации моделей за счет использования:
  - единой гибридной геолого-гидродинамической модели с общими данными и workflow.
  - объектного моделирования геологических объектов, основанных на прямых данных
2. Использование **объектной** (первичной, скелетной) **детализации** геологических объектов с наименьшим числом ячеек
3. Создание **сложных неравномерных расчетных сеток** (включая иерархические, многоуровневые, вложенные) для гибкой детализации особенностей фильтрационных потоков
4. Повышение степени «гибридности» симулятора **по 4 аспектам**: ГМ – ГДМ, регулярные – нерегулярные сетки, полномасштабное – детальное моделирование, традиционные – оперативные задачи разработки.



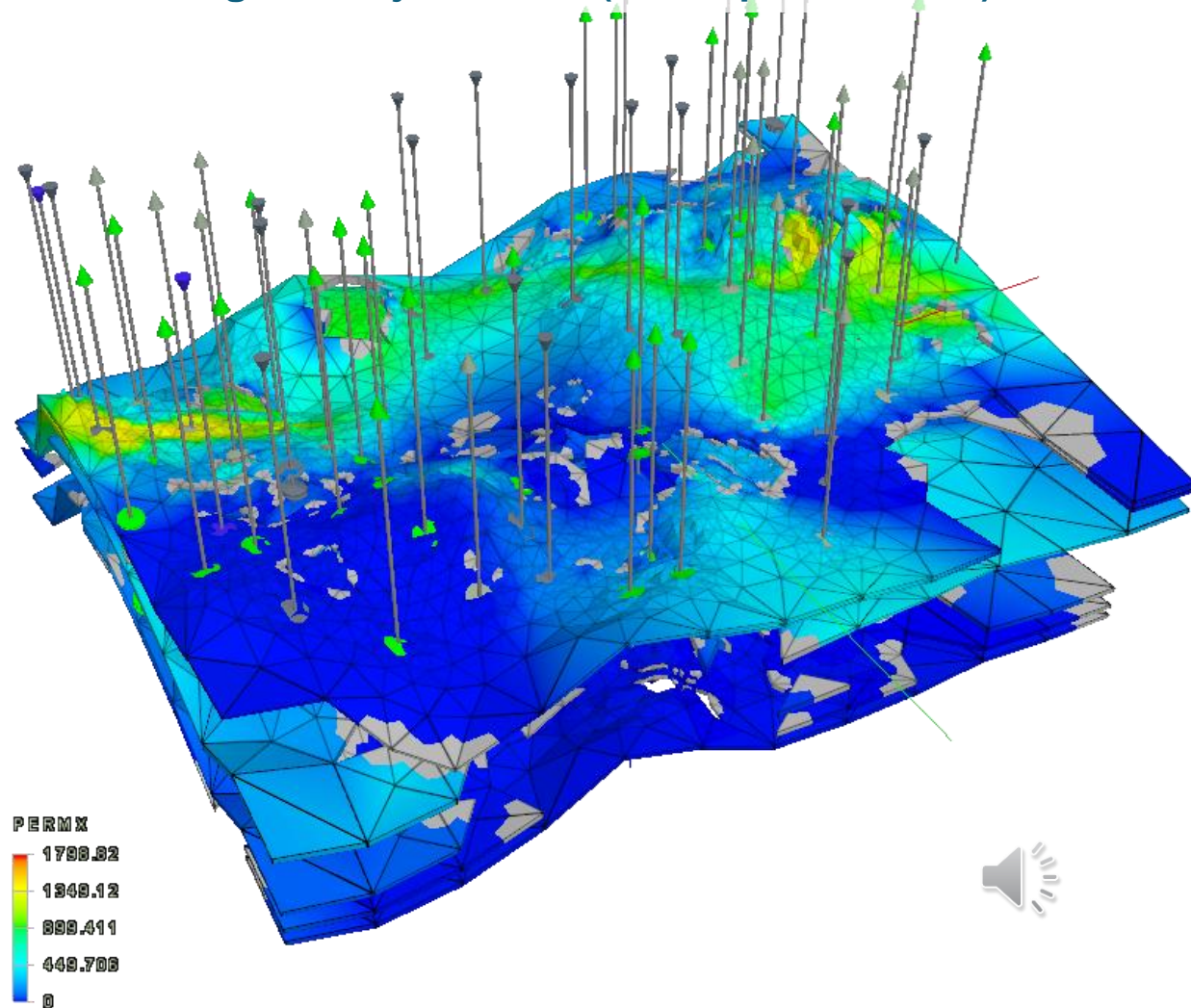


# Образ результата

Может быть представлен в виде:

- **набора неструктурированных сеток,** описывающих геологические объекты, минимальным число элементов;
- **набора алгоритмов** автопостроения, детализации и заполнения свойствами численных нерегулярных сеток, описывающих конкретные особенности фильтрации с учетом всей доступной геологической информации.
- **симулятора** со встроенными функциями геологического пакета способного считать на комплексных сетках задачи многофазной фильтрации;
- **визуализатора,** отображающего входные и выходные, расчетные данные.

Triangular Objects 2-3D (со встроенной ГМ)



# Предлагаемый подход – триангуляция сетки в плане

Триангуляция Делоне с ограничениями (строй, разбивая) используется для базовой сетки, описывающей геометрию (структуру и связи) пропластков.

## Выполняются требования:

- учет отрезков со свойствами – линии разломов, длинных трещин, траектории ГС;
- выделение порядка вставки точек и ребер разного типа;
- заполнение объема алгоритмами продвижения фронта и расположения точек по регулярной схеме;
- измельчение ячеек, граничащих с точками заданного приоритета на несколько уровней;
- сглаживание узлов с учетом приоритетов.

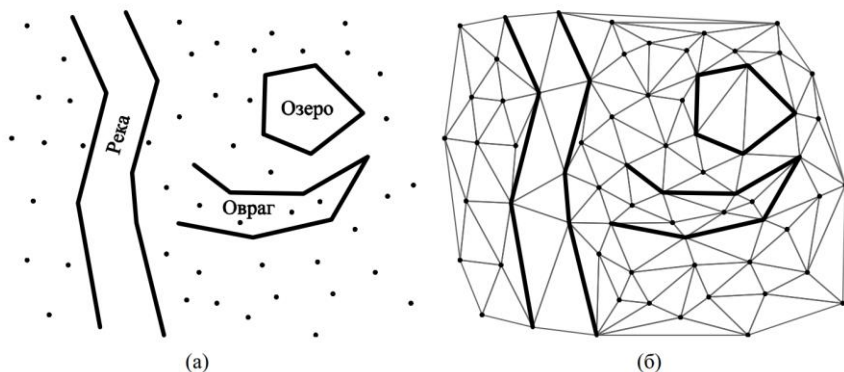


Рис. 1. Пример триангуляция с ограничениями (а — исходные данные, б — триангуляция)

А.В. Скворцов, Алгоритмы триангуляции с ограничениями, 2002.

## Mesh pre-processing form

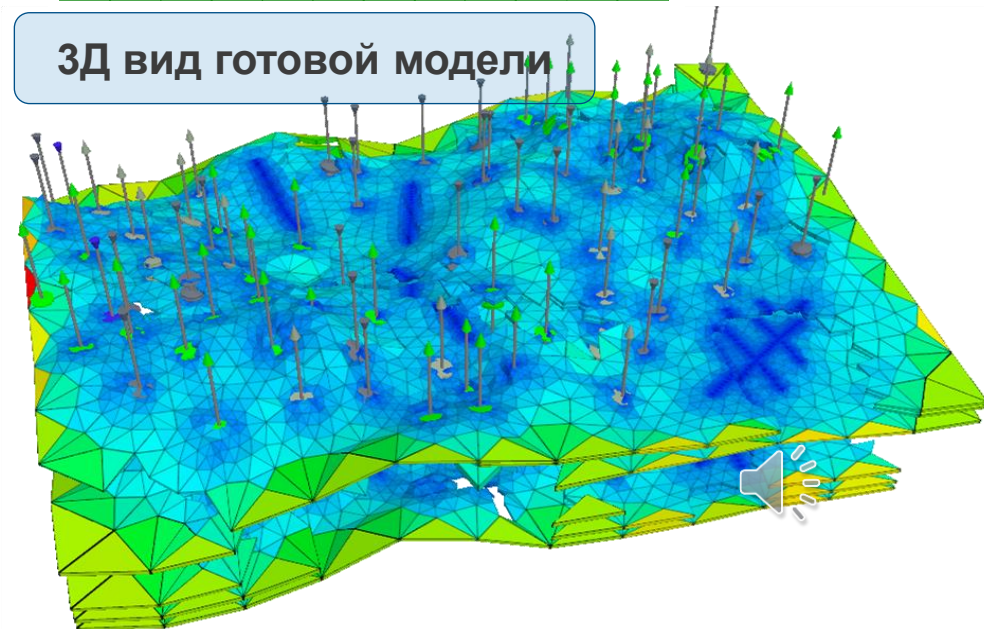
The screenshot shows the 'Mesh Creating' dialog box with the following settings:

- Boundary / Aquifer points
  - Model Rectangle
    - Size of Elements, m: 1300
  - Boundary from XYZ text file
    - boundary\_xyz.txt
- Wells
  - Minimal Distance, m: 10
  - Wellheads from IJ connections
  - Wellheads in XYZ text file
    - wells\_xyz.txt
- Bulk points
  - Size of Elements, m: 1000
  - Minimal Distance, m: 800
  - Angle, degree: -35
- Discretization Parameters
  - Advancing Front away from Wells
    - Number of Fronts: 15
    - Well Space, m: 500
  - Step-Refining Near Wells
    - Number of Levels: 1
    - Well Space, m: 500
  - Smoothing
    - Number of Iterations: 10

At the bottom right, there is a 'Create' button.



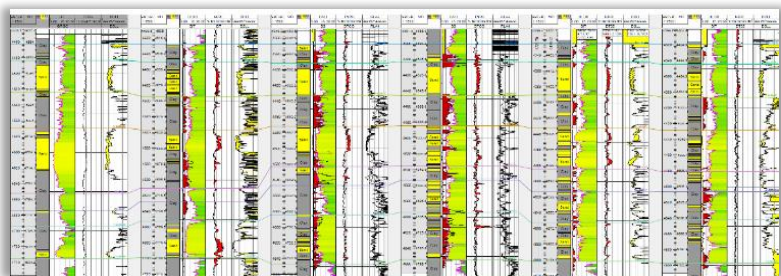
# Перестроение сетки с учетом задач фильтрации





# Предлагаемый подход – учет пропластков, трещин, разломов как объектов

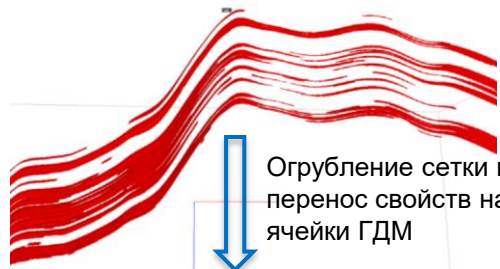
## РИГИС – 15 пропластков коллектора



Дискретизация кривых РИГИС на ячейки (dx, dy, dz)

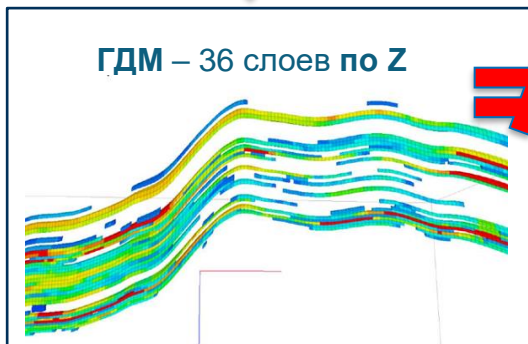
Описание границ пропластков, блоков, разломов объектной сеткой

## ГМ – 620 слоев по Z

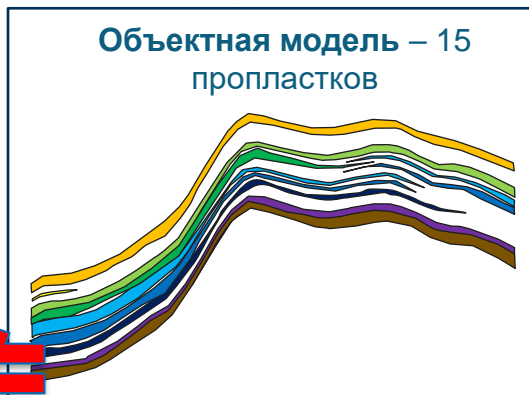


Огрубление сетки и перенос свойств на ячейки ГДМ

## ГДМ – 36 слоев по Z



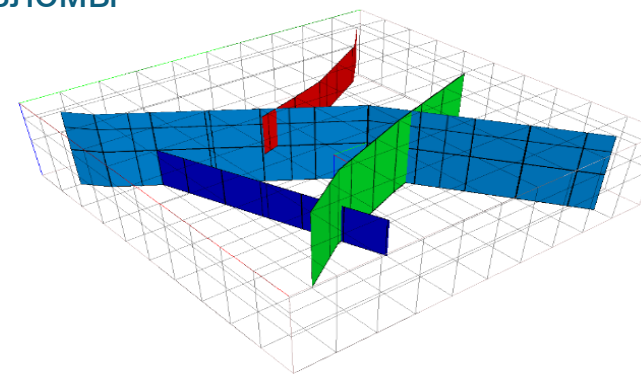
## Объектная модель – 15 пропластков



## Ввод новых объектов моделирования:

- пропластки – площадные объекты 2D, 3D
- длинные проводящие трещины и разломы – 2D объекты\*
- трещины гидроразрыва пласта (ГРП) – 2D объекты
- непроницаемые разломы

Длинные трещины и проводящие разломы (SPE 196885)



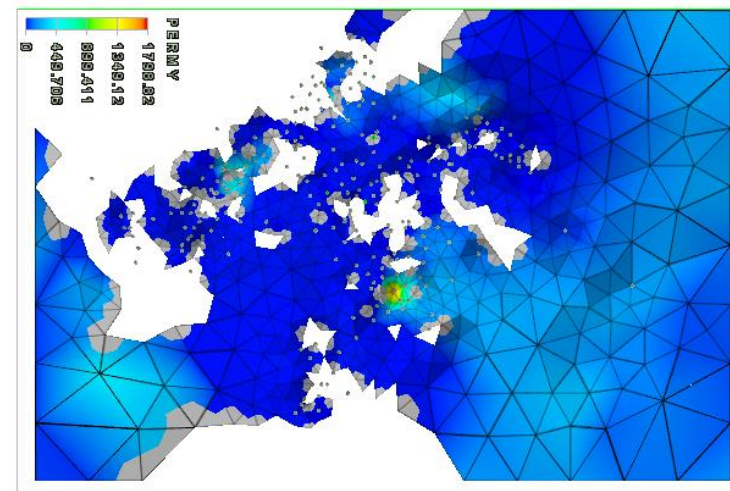
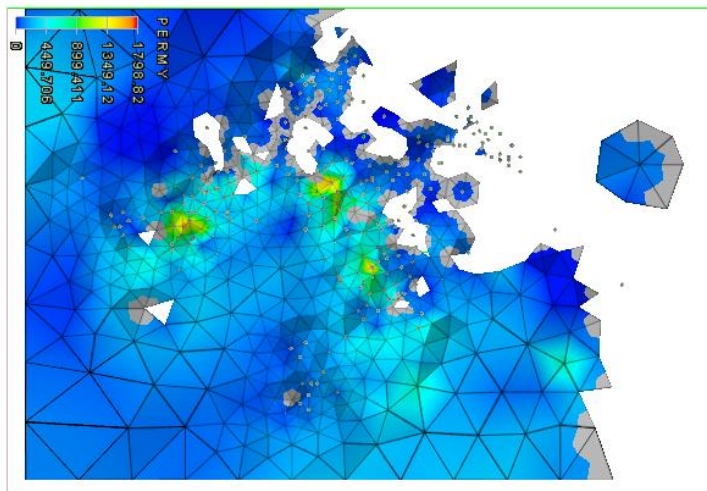
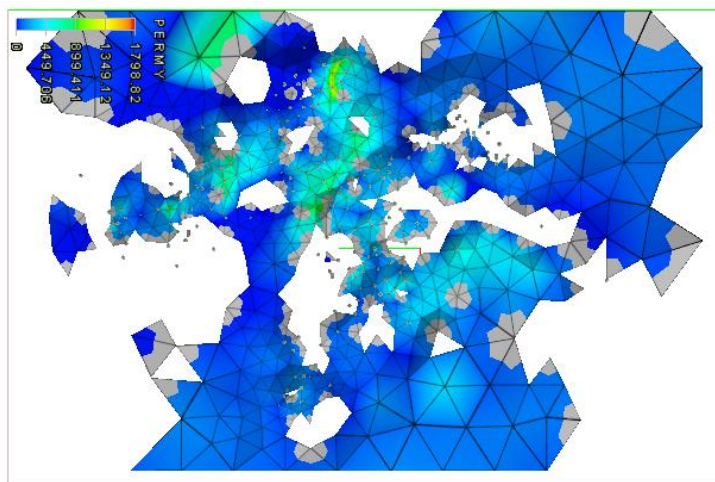
## Дискретизация по вертикали – набор пропластков на базе РИГИС

- Создание дискретных слоев в скважинах и поиск связности пропластков между скважинами.
- Замещение или выклинивание пропластка при наличии неколектора в соседней скважине
- Уточнение корреляции пластов на базе сиквенс стратиграфии (при неудовлетворительных результатах)

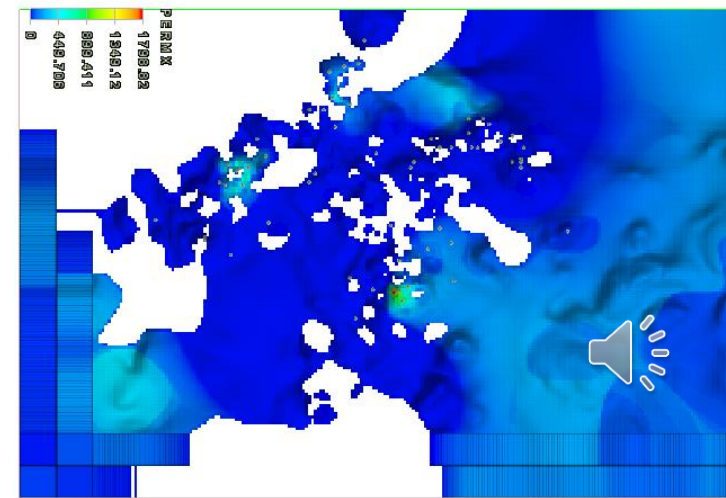
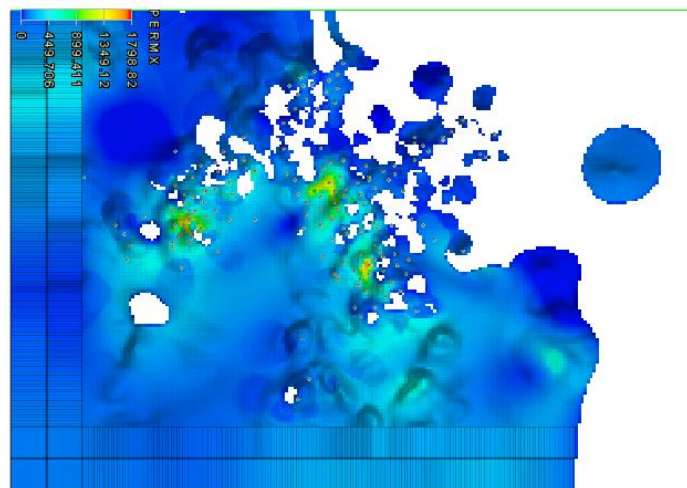
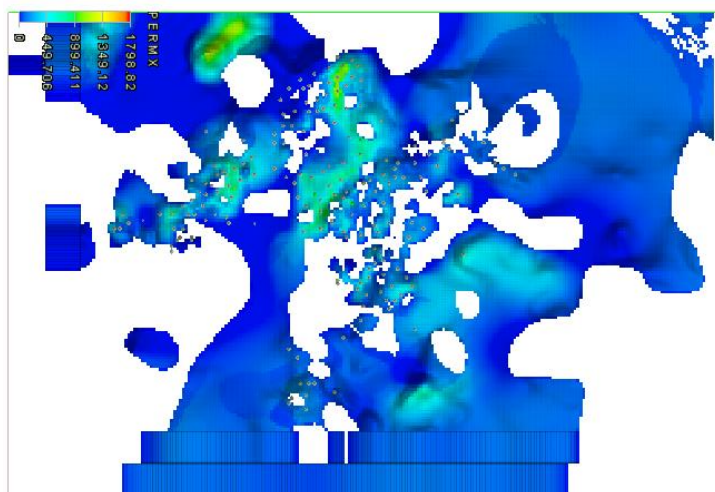


# Сравнение распределения отдельных пропластков как слоев и как объектов

Распределение пропластков и их свойства (Кпр) на объектной (первичной) сетке



Слой Z традиционной ГДМ, соответствующие дискретным пропласткам (выше)



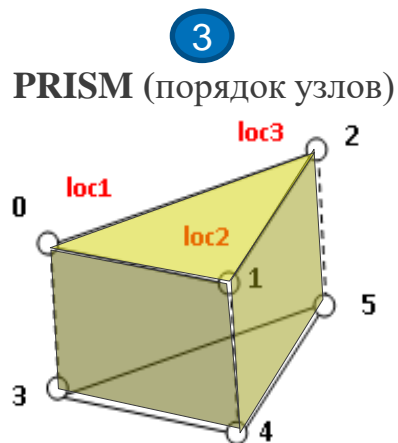
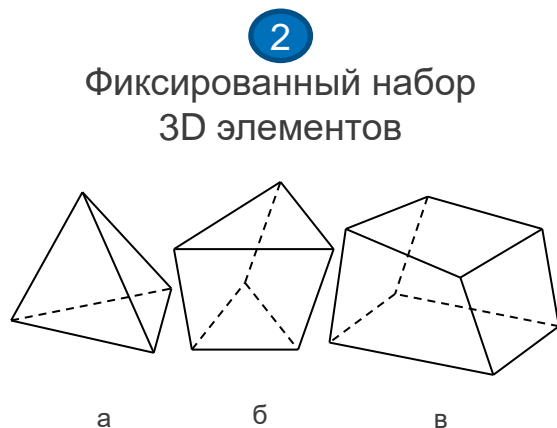
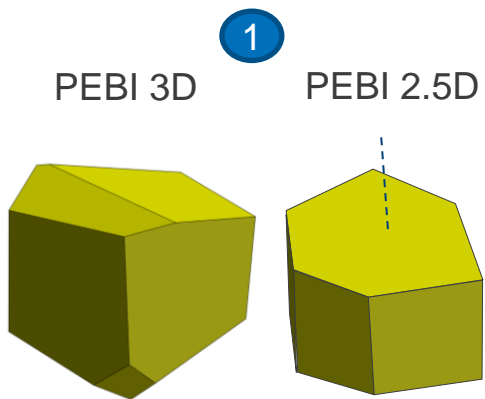


# Предлагаемый подход – сетка в 3Д

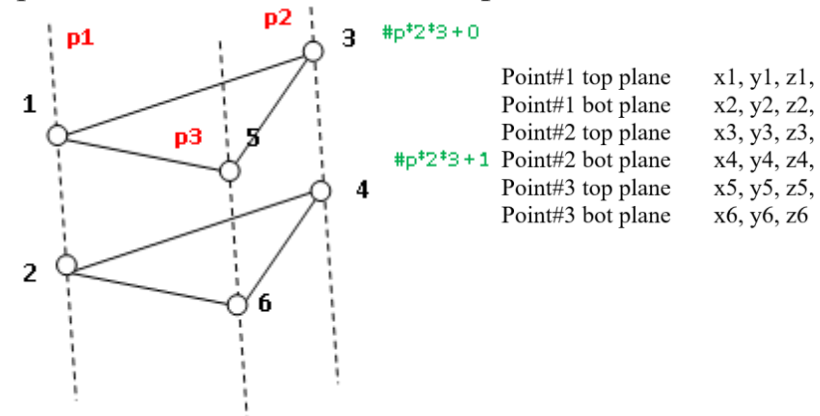
**Общий вариант: (1) Полностью трехмерная сетка с произвольными ячейками (PEBI 3D, PEBI 2,5D) не является экономичной для построения и хранения данных для полномасштабных и особенно мелких, детальных задач из-за множества дескрипторов сетки, ячейки которой разные по геометрии. Требуется построение первичной сетки.**

**(2) Трехмерная сетка с фиксированным набором элементов – достигается некоторая экономия и оптимизация.**

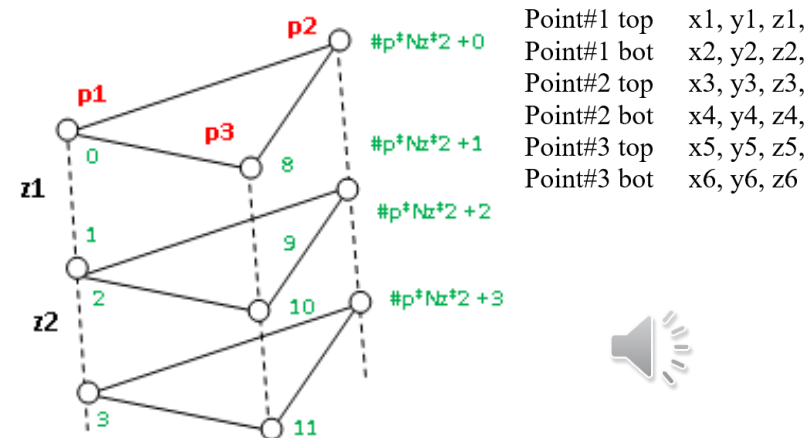
**Частный случай: (3) используем для описания сетку с распределенными узлами на базе элемента - треугольная призма и геометрией угловой точки для экономии дескрипторов по Z (для сотен слоев это важно!). Приближается к эффективности регулярной сетки.**



**COORD**  
размерность NoOfPlanePoints\*2{top, bot}\*3{X,Y,Z coords}

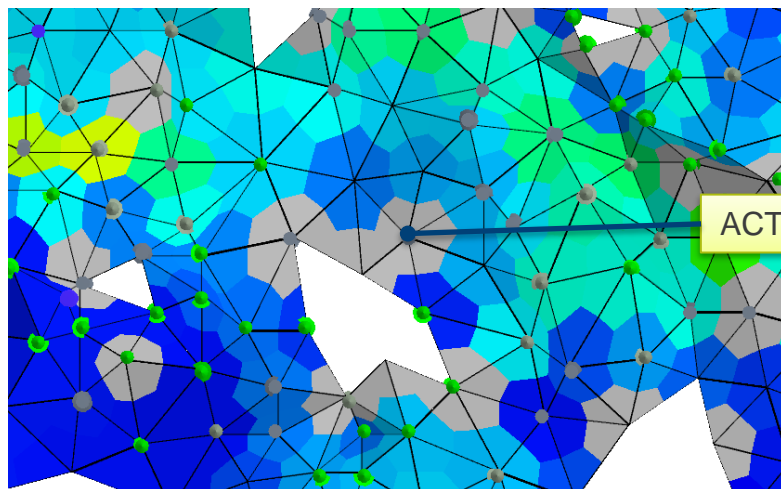


**ZCORN**  
размерность NoOfPlanePoints\*dwNZ\*2{topz, botz}

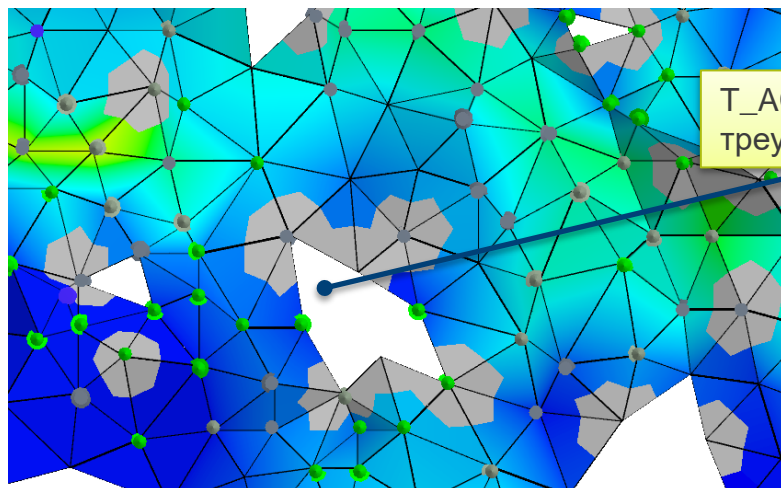


# Предлагаемый подход – особенности задания свойств на объектной сетке

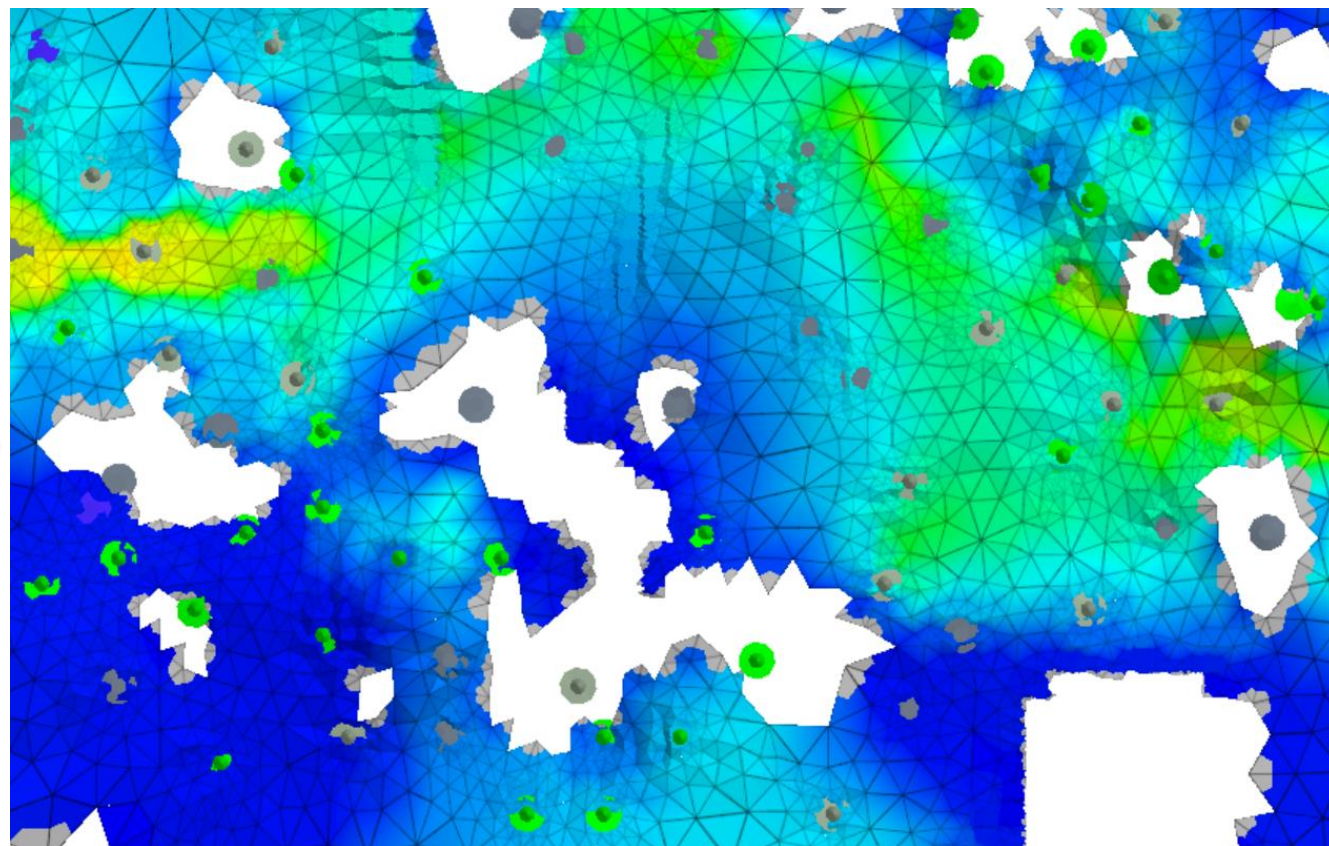
PERMX - блочно-центрированное описание



PERMX – с распределенными узлами



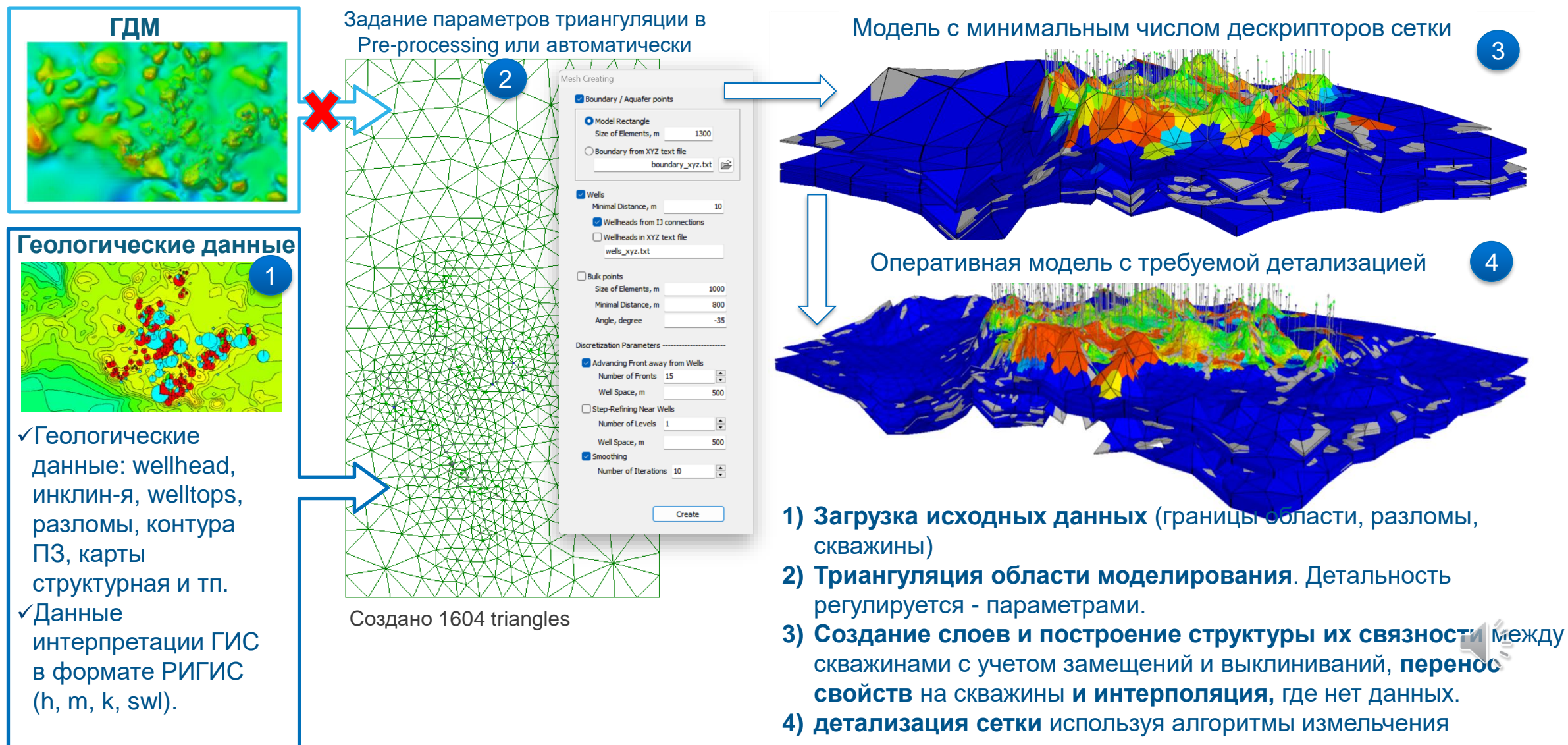
PERMX – на детальной сетке



Свойства задаются **в узлах (АСТNUM)** или в **треугольниках (Т\_АСТNUM)**.  
Аппроксимация свойств между узлами – как в блочно-центрированной сетке или как в сетке с распределенными узлами (линейная интерполяция).



# Предлагаемый подход – этапы создания оперативной модели





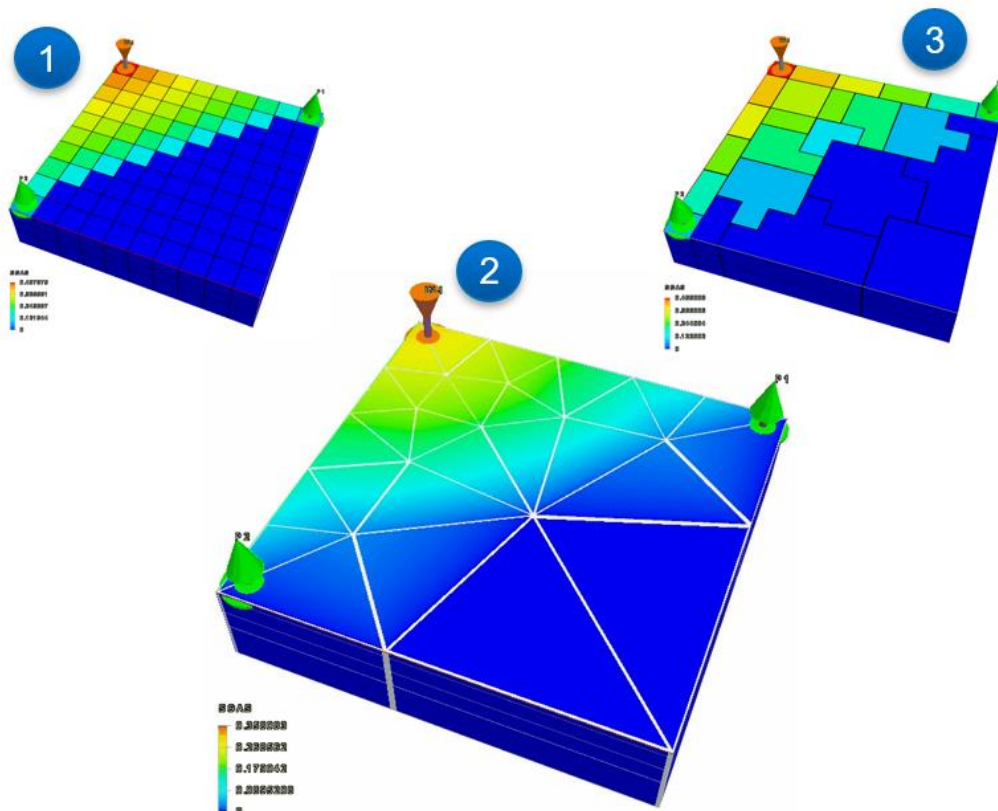
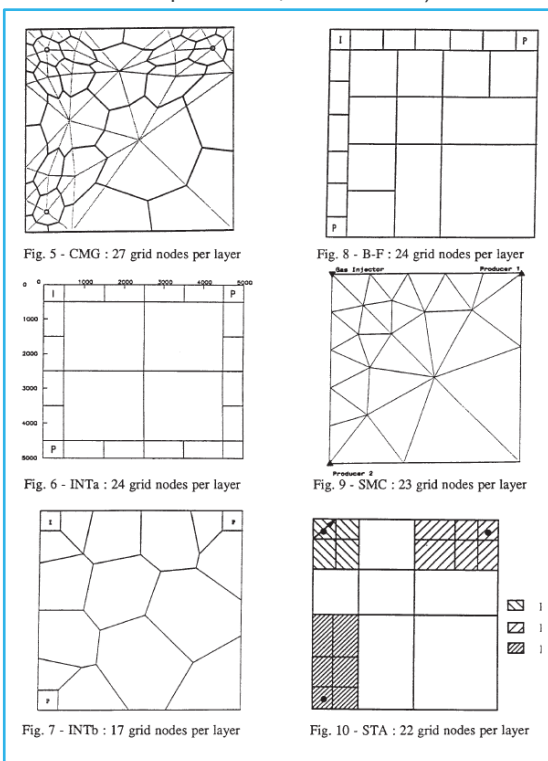


# Проверка на тесте SPE 8 – идеи сокращения числа ячеек

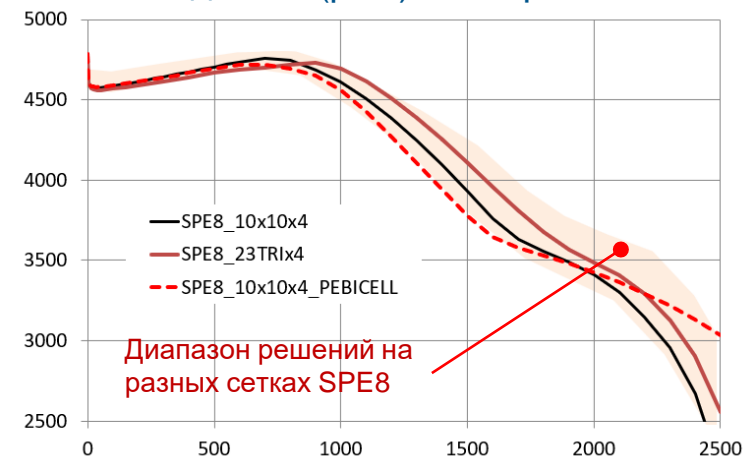
Идеи сокращения числа ячеек, оптимизации сетки с построением неравномерных сеток сложной геометрии были рассмотрены в тесте SPE 8 «Gridding Techniques». Рассмотрим 3 сетки: (1) регулярную, (2) триангуляционную (с MPFA), (3) неравномерную AD (аналог PEBI)

## Сетки из SPE 8

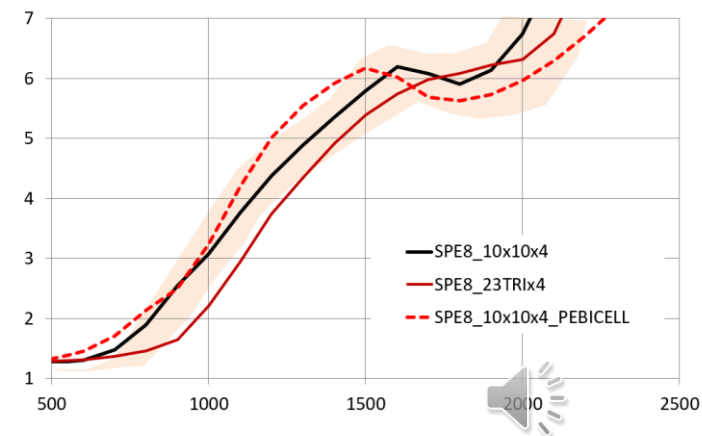
(закачка газа в неоднородный по слоям нефтенасыщенный пласт)



## Свод Pзab (psia) по вариантам



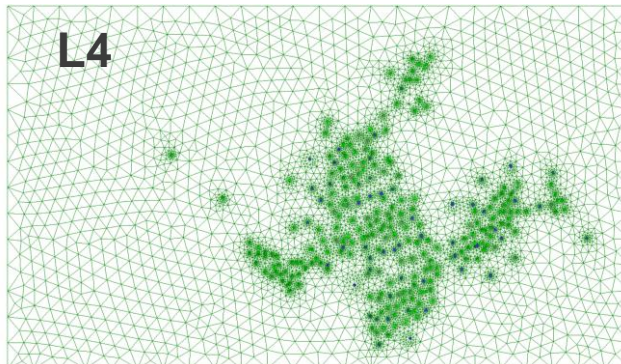
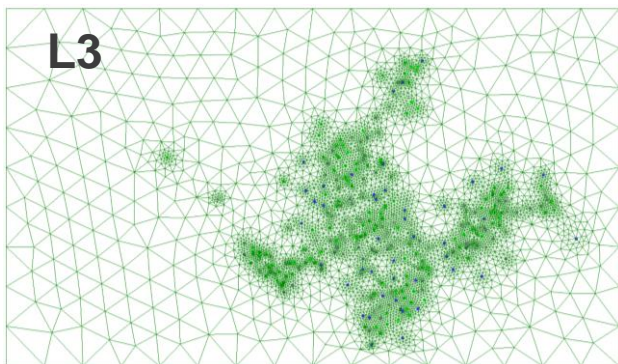
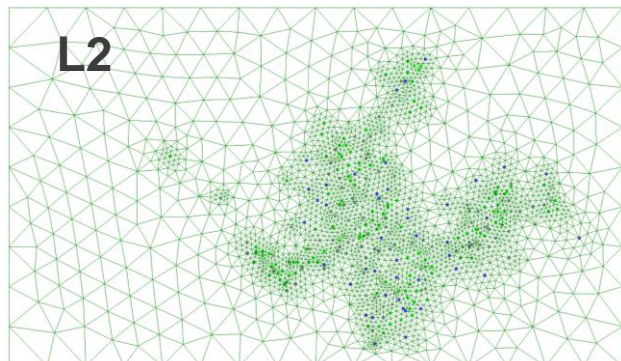
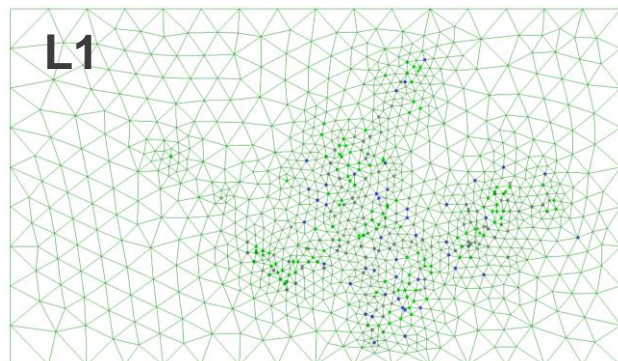
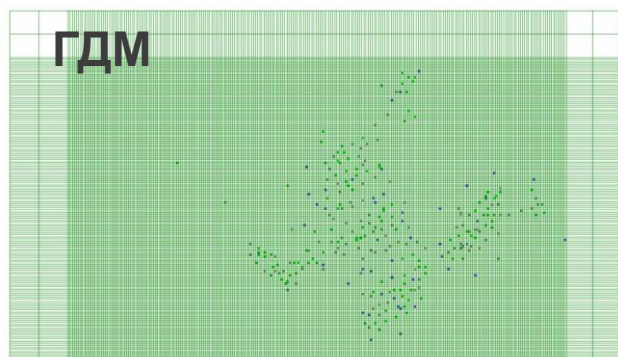
## Свод Гф (mcf/bbl) по вариантам



**Вывод:** для предлагаемой сетки и выбранной реализации численных алгоритмов результаты теста показывают, что даже в специальном тесте с прорывом газа, отклонения прогнозных параметров приемлемые. Вариант с PEBI дает хуже результаты.

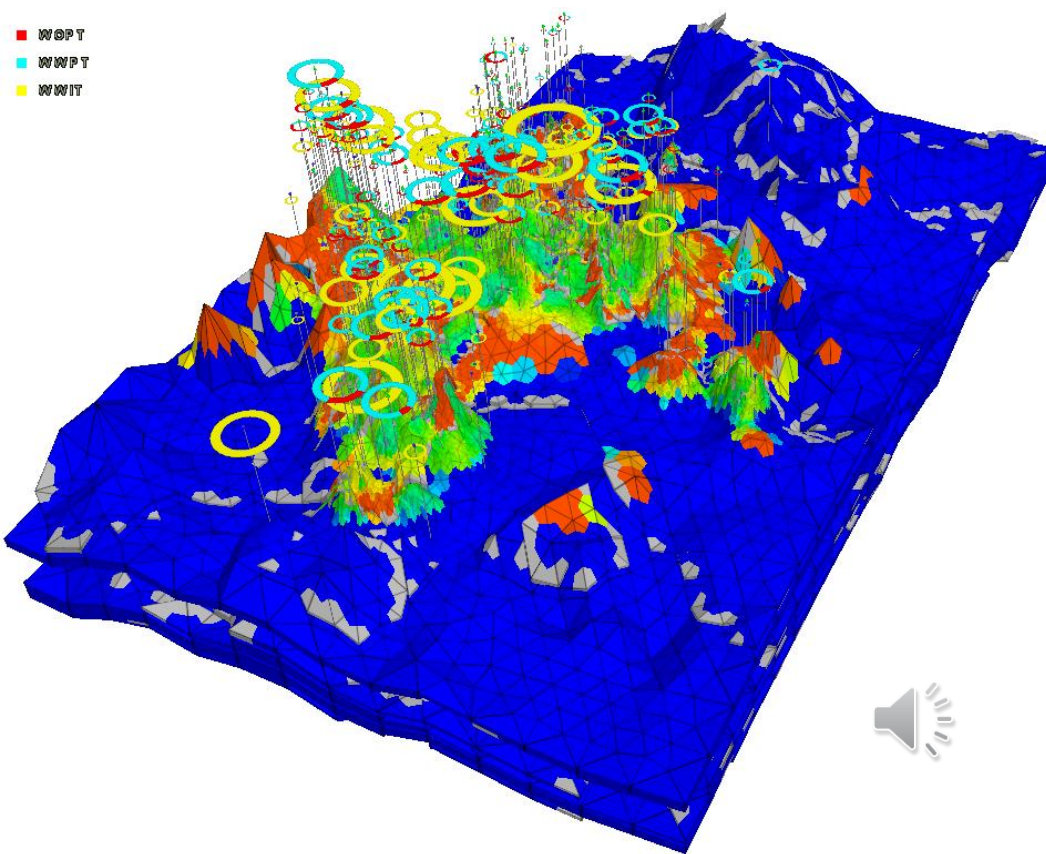


# Результаты – выполнение полномасштабных расчетов



## Описание модели:

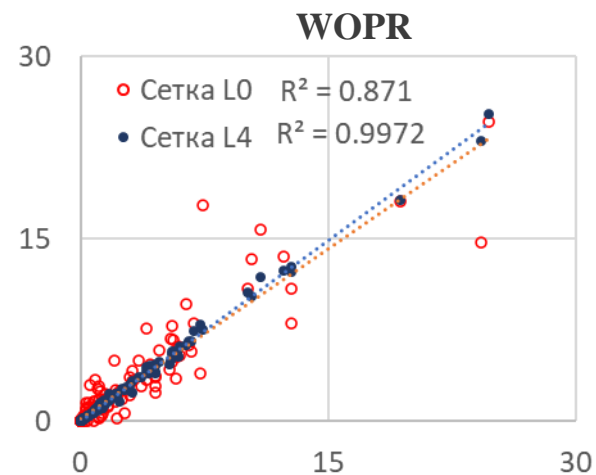
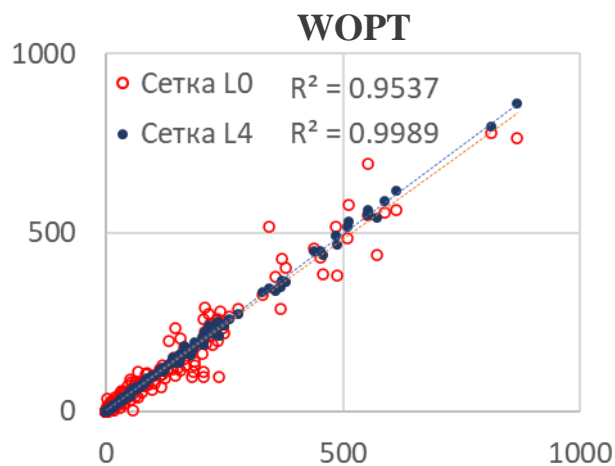
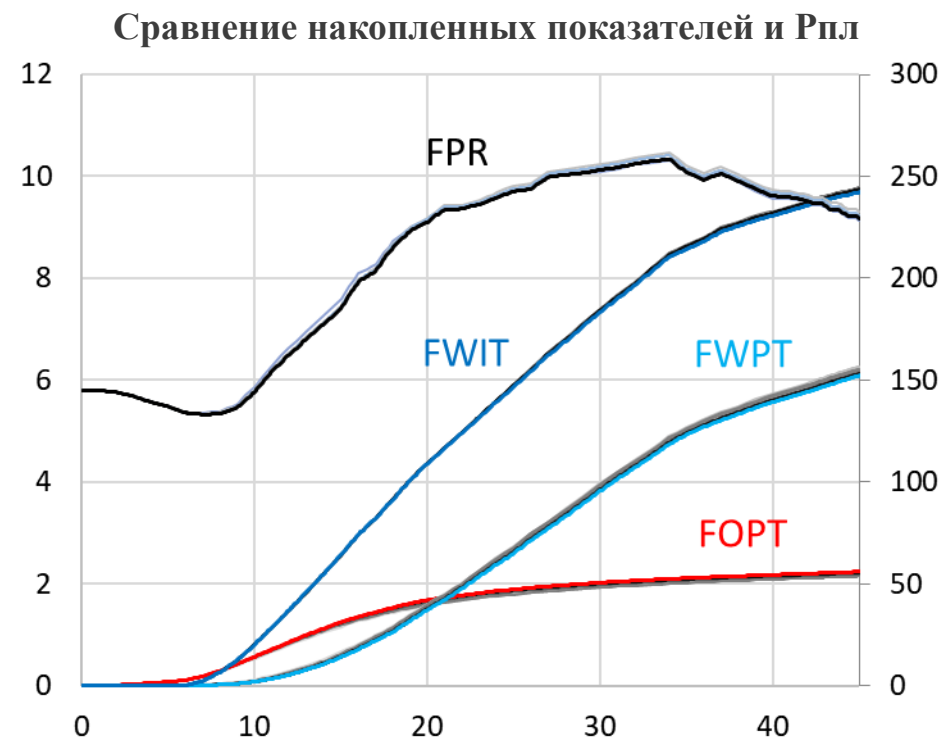
- Тип: трехфазная - нефть, раств.газ, вода
- Размерность 148x 243x100, акт.ячеек - 1.6 млн.
- Число скважин: 265 (159 доб.+ 106 нагн.)
- Продолжительность: 45 лет





# Результаты – выполнение полномасштабных расчетов

Параметр	Уровень детализации					
	ГДМ	Объектный	1	2	3	4
Активных ячеек, тыс. штук	1562	31	64	146	270	320
Время расчета (ТCPU), сек	3828	52	92	268	724	808
Сокращение ячеек от ГДМ	1	50	24	11	5.8	4.9
Ускорение	1	<b>74</b>	<b>42</b>	<b>14</b>	<b>5.3</b>	<b>4.7</b>
<b>Отклонение текущих и накопленных показателей, %</b>						
Дебит нефти скважин (WOPR)	0	23	18	11	5.4	4.0
Дебит воды скважин (WWPR)	0	11	9	7	3.3	2.2
Нак. добыча нефти скважин (WOPT)	0	17	12	7.6	3.4	2.4
Нак. добыча нефти скважин (WWPT)	0	17	13	10.5	5.5	4.1
Нак. добыча нефти (FOPT)	0	-2.5	-2.8	-2.1	-2.0	-1.1
Нак. добыча воды (FWPT)	0	2.3	2.8	2.0	0.8	0.6
Добыча нефти (FOPR)	0	3.4	1.8	-0.2	-0.4	-0.5
Добыча воды (FWPR)	0	4.9	3.1	0.6	0.5	0.5
Пластовое давление (FPR)	0	-0.4	-1.3	1.5	1.2	0.8



## Вывод:

- Сокращение TCPU на первичной сетке – **74 (!)** раза при сокращении числа ячеек в 50 раз.
- Погрешности накопленных показателей за 45 лет разработки – 2%, по текущим – до 5%.
- По мере увеличения детализации сетки погрешности быстро сокращаются.

# Результат применения – преимущества и недостатки

## Особенности

- Упрощение ГМ в случае сложных геологических объектов за счет использования модели пропластков. Вариант использования готовых ГМ или ГДМ применялся ранее, однако он имеет свои ограничения и недостатки.
- Описание геологических объектов минимальным числом дескрипторов сетки.
- Использование треугольной призматической сетки с пилларами (pillar grid).
- Дискретизация расчётной сетки применяется на более поздних этапах моделирования, когда известны конкретные особенности фильтрации.
- Значительное сокращение времени перестроения модели и времени расчетов для задач обычной и невысокой точности – настройка на историю, материальный баланс, оптимизационные задачи, оценка энергетики и т. п.

## Преимущества (над традиционным и РЕВІ подходом)

- Узловая и блочная аппроксимация потоков
- Много-точечная аппроксимация потоков – учет тензора Кпр
- Описание сложной геометрии малым числом элементов
- Скважины в узлах – не искажается расстояние между скважинами из-за смещения в центры ячеек и нет погрешности в глубинах при больших  $DX$ ,  $DY$
- Может использоваться интерполяция между узлами, структурная поверхность строится автоматически
- Использование напрямую граничной информации (контуры, блоки, разломы)
- Неоднородность учитывается измельчением первичной сетки и прямым переносом свойств (сейсмика, карты)
- Гибкость изменения размерности модели

## Недостатки в сравнении с традиционным подходом

- Непривычность работы в сравнении с СР сеткой
- Эффективность численных алгоритмов при том же числе элементов ниже в 1.5-2 раза, чем для регулярных сеток.
- Стохастическая или мелкая неоднородность потребует более мелкие сетки – придется апскейлить свойства на уровни выше, чтобы не потерять эффективность подхода



# Заключение

## Результаты

1. Предложен подход построения моделей, расширяющий возможности геолого-гидродинамического моделирования и позволяющий значительно сократить время расчетов при решении оперативных задач разработки.
2. Разработан прототип симулятора, решающего задачи в рассматриваемой постановке, основные алгоритмы которого протестированы.



## Перспективы и направления развития

1. 3D и 2D визуализация с учетом особенностей геометрии объектов, сеток и ячеек.
2. Реализация методов распараллеливания решения на нерегулярных сетках (CPU, GPU).
3. Совершенствование подхода при решении различных рутинных задач разработки, используя единую геологическую и гидродинамическую основу со всей имеющейся геолого-промысловой информацией.
4. Гибридизация симулятора по 4 направлениям интеграции: ГМ – ГДМ, регулярные – нерегулярные сетки, полномасштабное – детальное моделирование, традиционные – оперативные задачи разработки.



---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**