

Цели и задачи исследования

- Влияние особенностей архитектуры резервуара на эффективность его разработки заводнением
 - Детерминистская и стохастическая модели: что точнее отражает строение резервуара?
 - Оценка влияния неоднородностей резервуара на динамику его разработки с использованием разных методик и критериев:
 - Сравнение результатов двумерного и трехмерного моделирования
 - Накопленная добыча
 - Динамика добычи

Введение

- **Архитектура резервуара** – пространственное размещение участков с различным литологическим составом (различной пористости, проницаемости и т. д.) => Эти различия служат причиной вариаций потока флюидов
- Для более точного моделирования архитектуры резервуара могут быть использованы **данные изучения обнажений**
- Адекватность уже созданной модели может быть повышена ее уточнением данными изучения обнажений

Методология: сбор данных

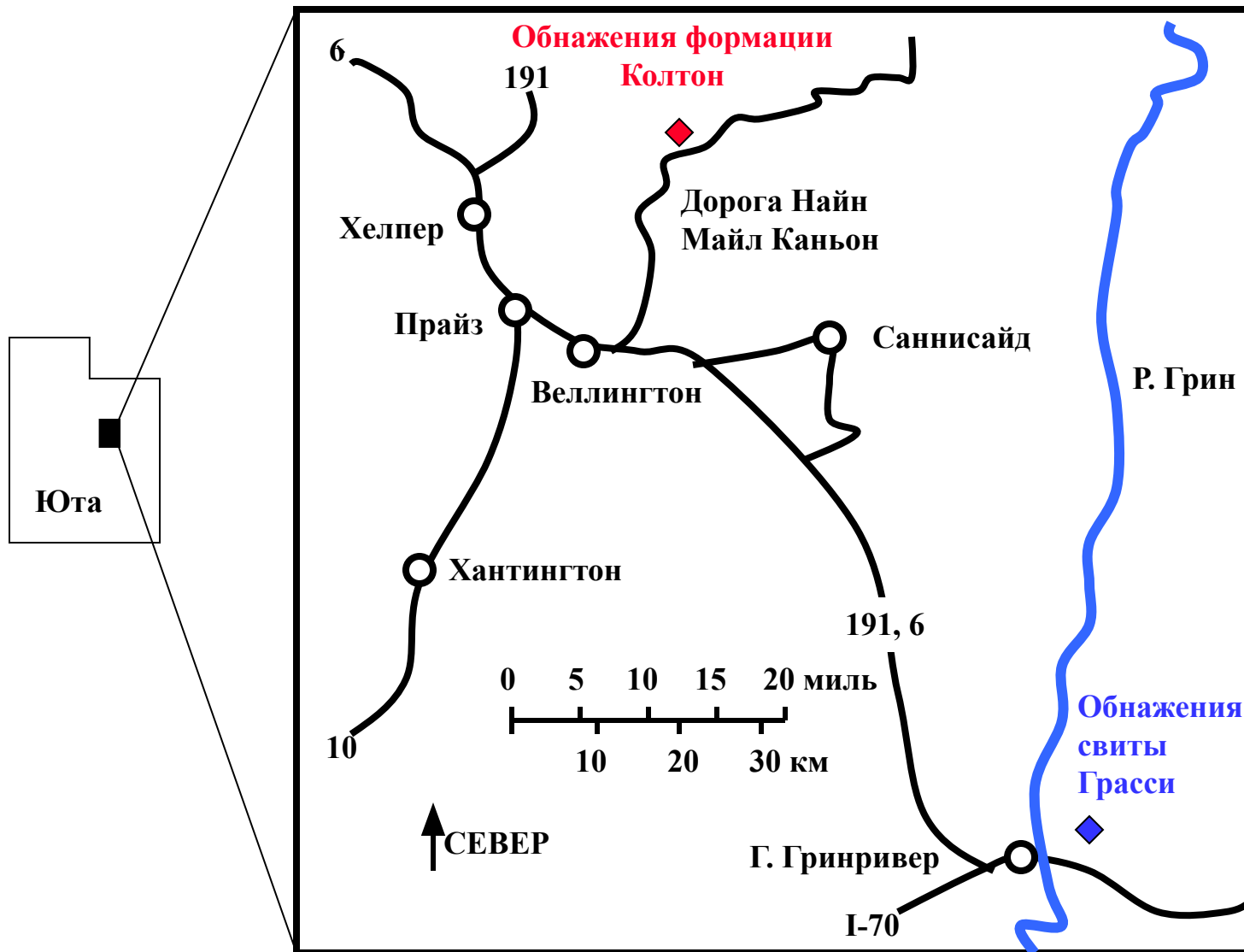
- Выбраны обнажения для двух различных обстановок:
 - Мелководно-морская (свита Грасси формации Блэкхоук)
 - Аллювиальная (формація Колтон)
 - Фотографии и фотомонтажи обнажений
 - Картирование латеральных взаимоотношений песчаных и глинистых тел
 - Фактический материал
 - Построение двух стратиграфических колонок/разрезов
 - Замеры гамма-фона радиометром вдоль каждой колонки
 - Отбор образцов для изготовления шлифов (для важнейших фациальных типов пород)
- ⇒ Этот набор данных (ГК и описание керна) вполне сравним с тем, что получает геолог для двух скважин на реальном

Методология: моделирование

- Детерминистская модель
 - Использование ГК и описания керна для определения единиц потока
 - Межскважинная корреляция и создание слоистой модели
- Стохастическая модель
 - Использование объектно-ориентированное объектное моделирование по данным двух разрезов/колонок
 - Данные о размерности объектов – по фотомонтажам
- Допущение постоянных значений пористости и проницаемости для каждой фации
 - Осредненные значения реальных месторождений
- Огрубление (upscaling) модели для однофазного потока
 - Арифметическое среднее – для пористости, диагональный

Методология: моделирование потока

- Моделирование разработки заводнением
 - ACRES (геологическое моделирование)
 - FRONTSIM (гидродинамическое моделирование)
- Линейная схема заводнения
 - Две нагнетательные и две добывающие скважины
 - Начальное пластовое давление = 2900 psia.
 - Давление на забое нагнетательных скважин = 4500 psia.
 - Давление на забое добывающих скважин = 1500 psia.



Местоположение изученных обнажений на северо-востоке штата Юта (США)

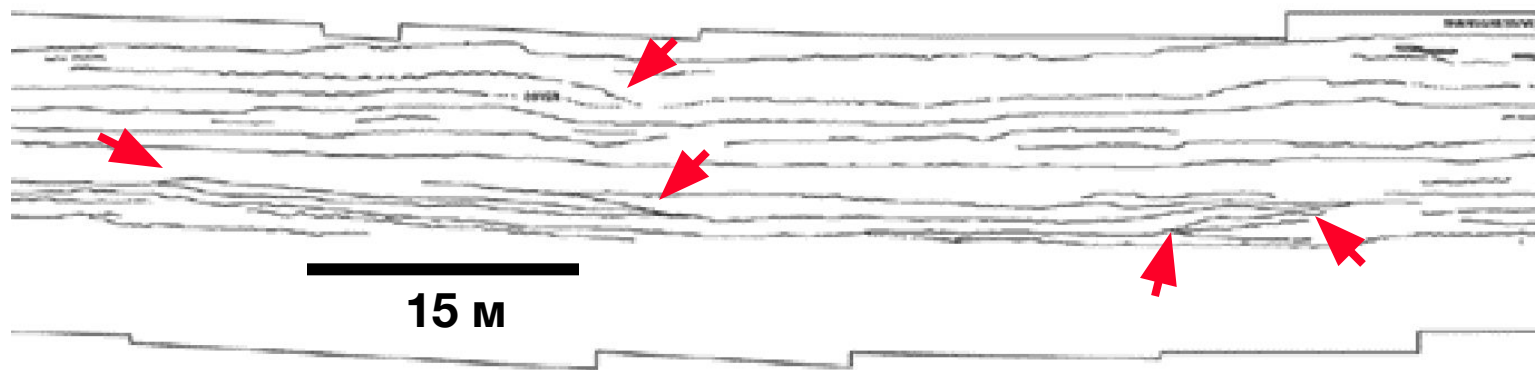
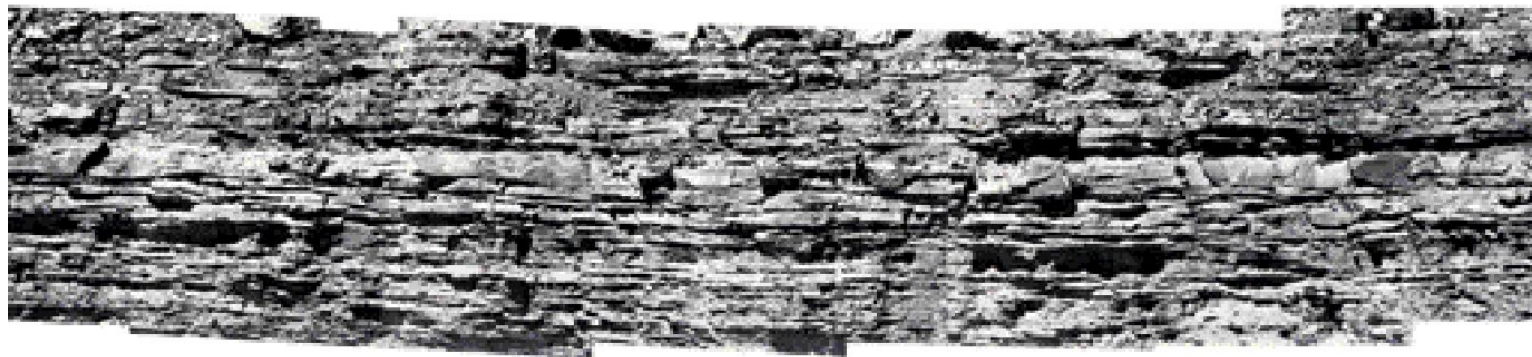
Объект 1: Мелководно-морская обстановка

- Свита Грасси – проградационная (регрессивная) часть поздне меловой формации Блэкхоук
- Местонахождение: Коал Каньон, Юта
- Протяженность обнажения ~ 2600 футов (~ 800 м)
- Основные литологические типы пород:
 - Хаотично-косослоистые песчаники
 - Волнисто-слоистые и флазерные песчаники
 - Линзовидные песчаники
 - Тонкослоистые и биотурбированные песчаники и алевролиты

Объект 1: Мелководно-морская обстановка

- Свита Грасс: обстановки от нижней части волноприбойной зоны (нижняя сублитораль) до шельфовой платформы
- Нижняя часть разреза свиты Грасс формирует в современном рельефе хорошо выраженный уступ высотой около 30 м, на 75% сложенный песчаником
- В двух разрезах (300 м друг от друга) фиксируются четыре песчаных ритма с увеличивающейся к кровле зернистостью
- **Ключевой момент:** экранирующий эффект прослоев глин в пачках хаотично-косослоистых песчаников

Латеральное выклинивание мелководно-морских песчаников свиты Грасси



Песчаные тела, имея значительную латеральную протяженность, выклиниваются, замещаясь глинами (места выклиниваний помечены стрелками)

Выклинивание мелководно-морских песчаников

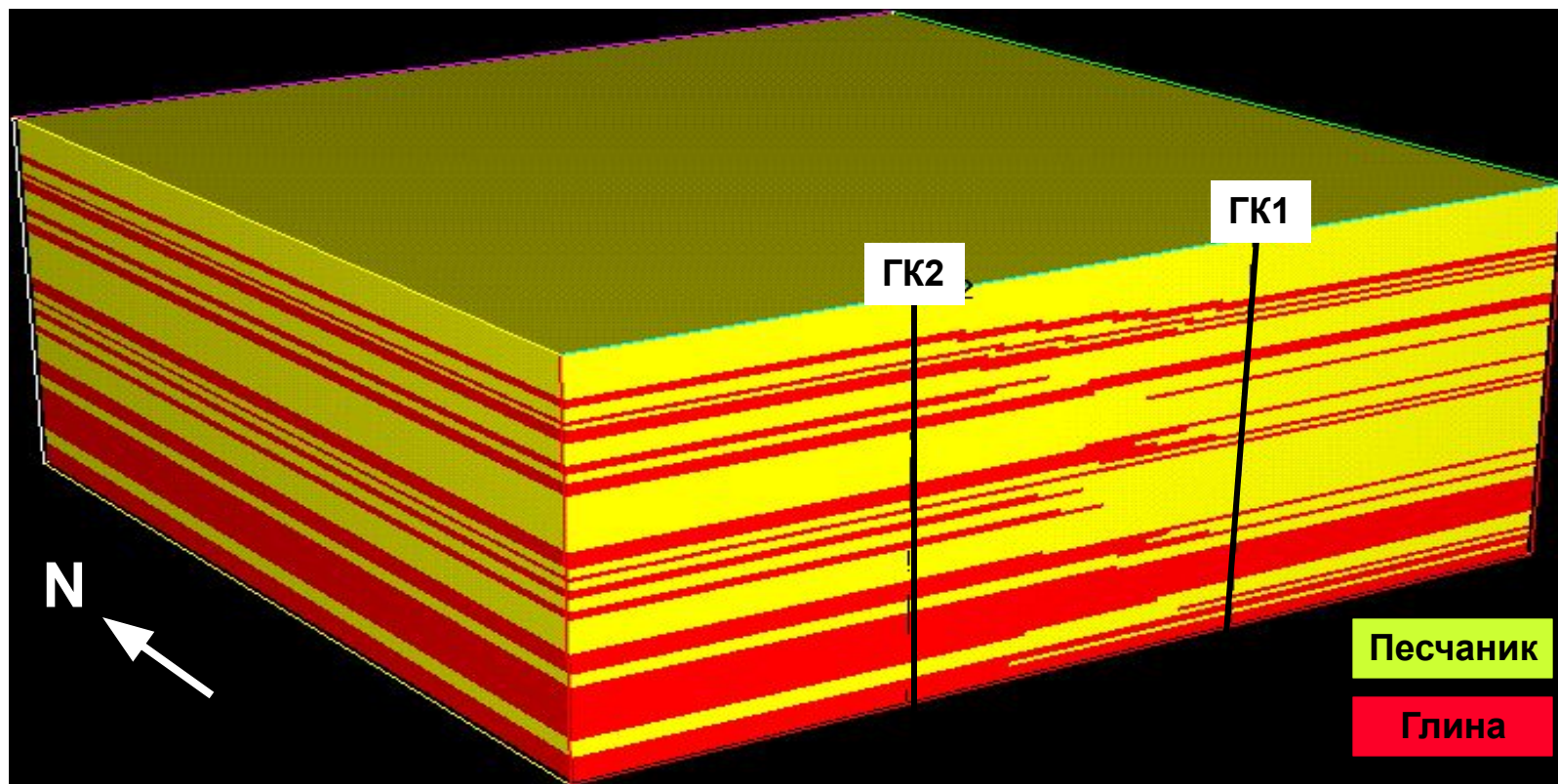


- **Выклинивание вследствие «мягкой» деформации нелитифицированного песчаного осадка**



- **Песчанистое линзовидное заполнение промоины, снизу и сверху «заключенное» в глину: частичное экранирование**

Детерминистская фациальная модель

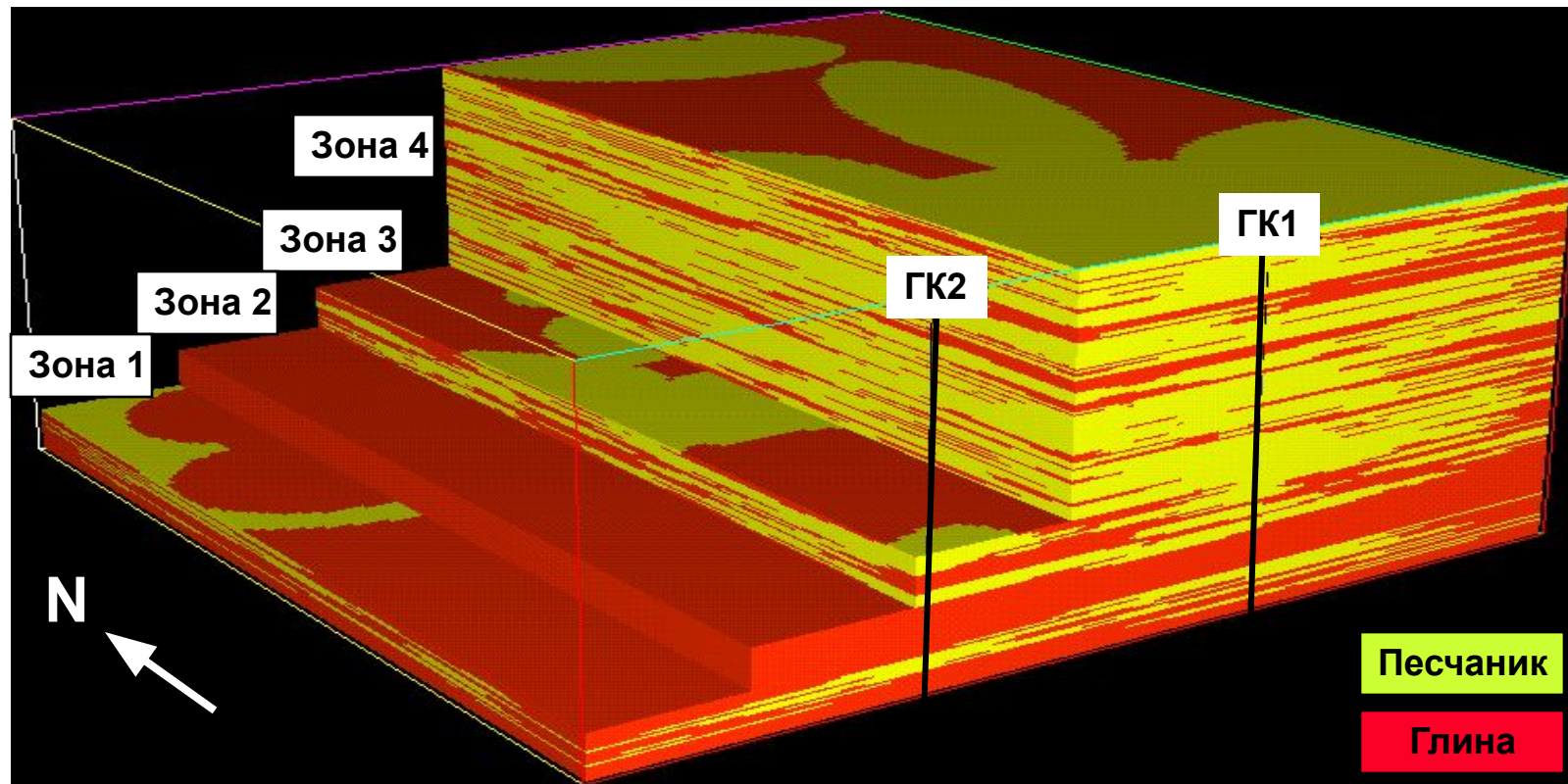


Детерминистская фациальная модель (780x780x30 м): большинство песчаных и глинистых тел в ее пределах непрерывны. Такая корреляция базируется на двух разрезах (ГК1 и ГК2). Модель состоит из 130x130x100 ячеей (около 1, 7 млн.); каждая ячейка имеет размеры 6x6x0,3 м

Стохастическая модель

- Необходимые исходные данные для построения:
 - протяженности по латерали, толщины и геометрические пропорции песчаных тел
 - геометрия тонких прослоев глин
 - вариации латеральной непрерывности и отношение «эффективные/общие толщины» для четырех песчаных ритмов
- Решение:
 - Использование объектно-ориентированной технологии: моделирование эллиптических в плане песчаных тел, «включенных» в глинистую массу
 - Построение четырех зон с различными значениями отношений «песок/глина» и протяженности

Стохастическая фациальная модель свиты Грасси

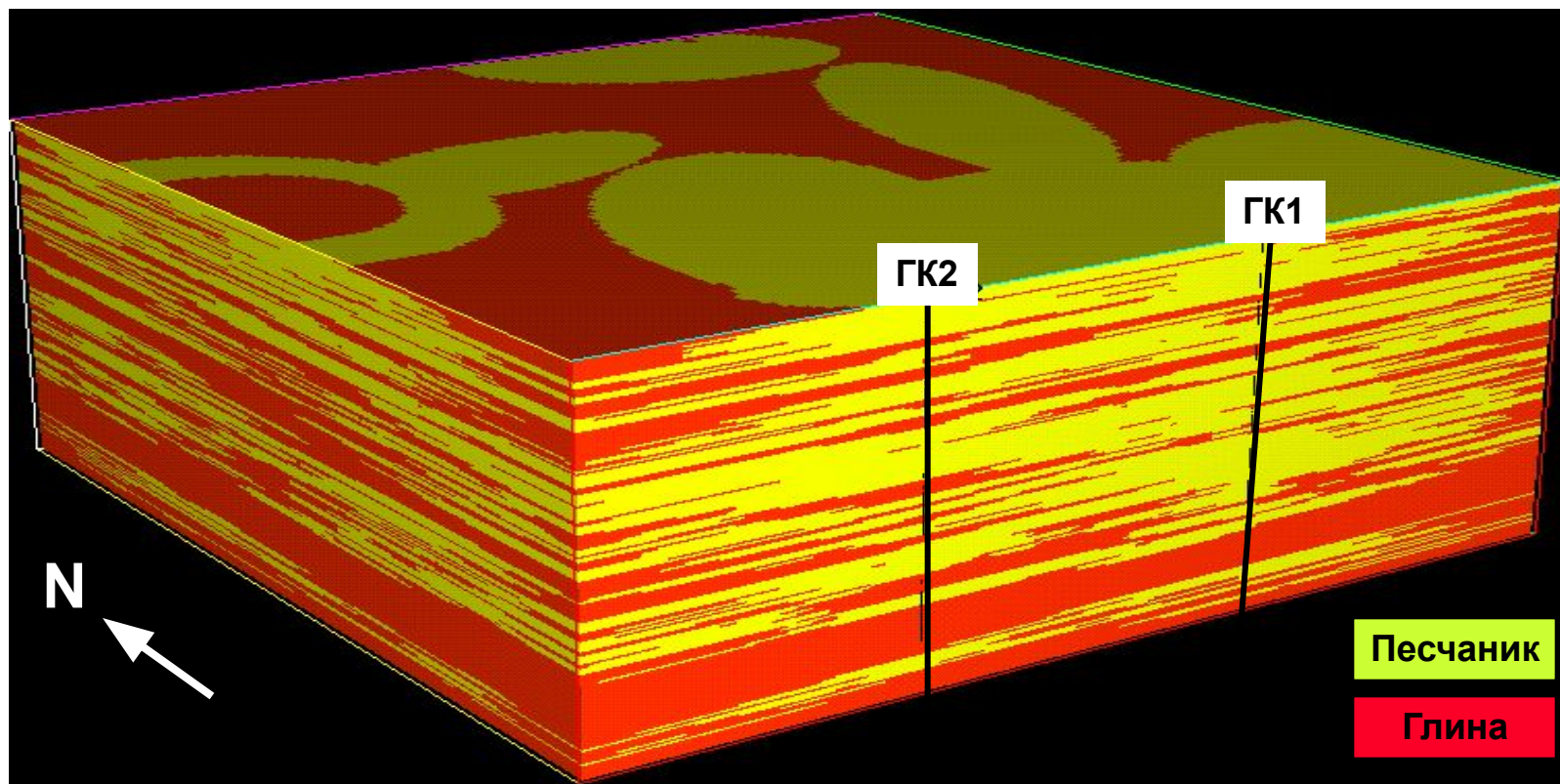


Стохастическая фациальная модель (780x780x30 м): эллиптические в плане песчаные тела в глинистой массе. Весь разрез разделен на 4 зоны с различными значениями отношения «эффективная/общая толщина», размерностей и латеральной непрерывности объектов. Зона 2 – немоделируемый (заданный «вручную») слой глины

Стохастическая модель

- В зонах с долей песка >35-40% при моделировании происходит «объединение» песчаных прослоев, что приводит к преувеличению (по сравнению с обнажением) их толщин
- Применяются два технических способа коррекции:
 - введение в модель значений толщин песчаников (где они преуменьшены)
 - введение в пески прослоев глин
- Результирующая «троичная» модель (глина-песок-глина)
 - Размеры модели: 780x780x30 м
 - Размер ячей: 6x6x0.15 м
 - Общее количество ячей: ~3.4 млн

Стохастическая фациальная модель свиты Грасси



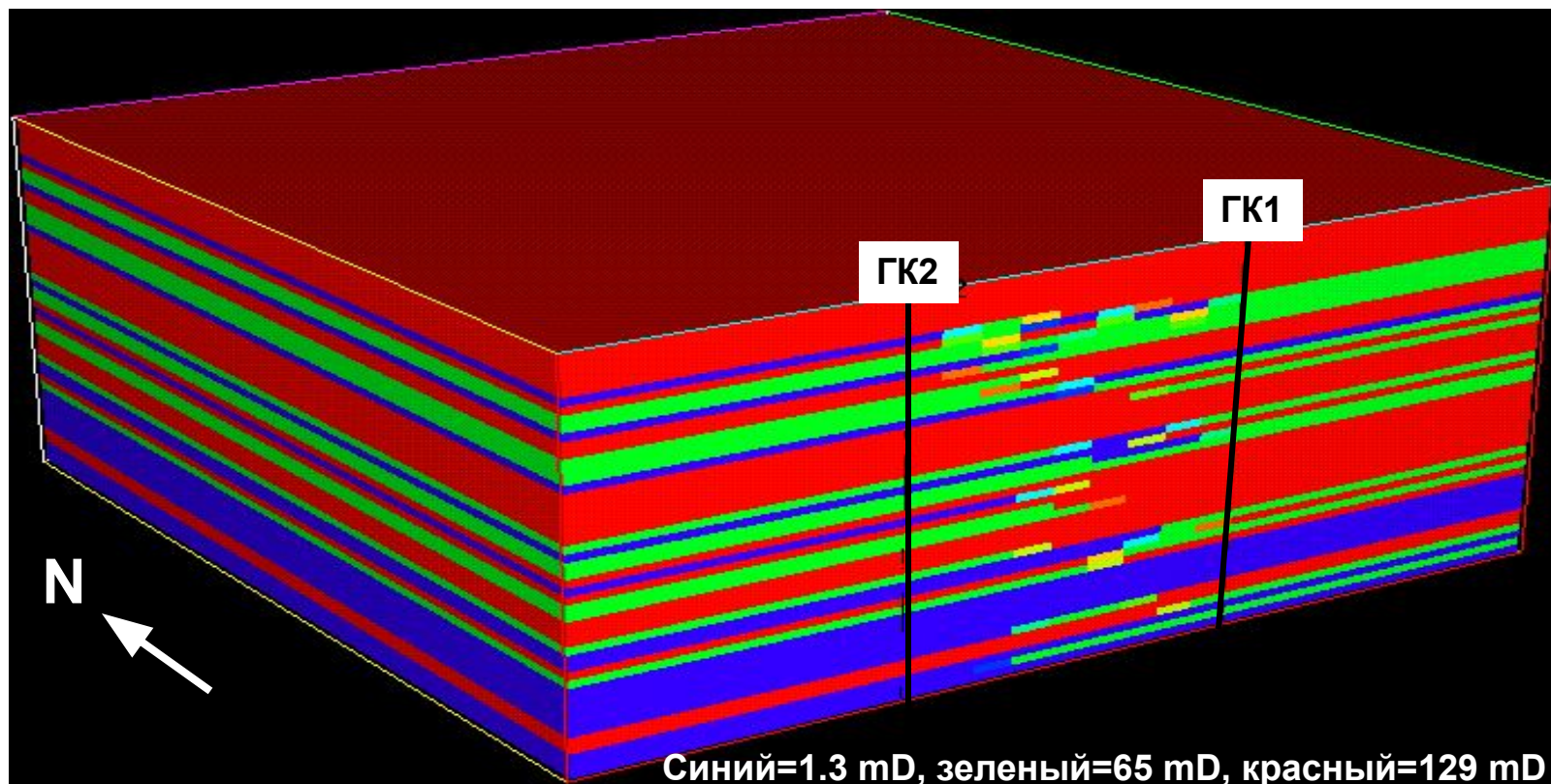
Стохастическая модель: гораздо более высокий уровень латеральной и вертикальной неоднородности резервуара, чем при детерминистском моделировании

Пористость и проницаемость

- Каждой литологической разности (литотипу) в модели соответствуют установленные свойства:
 - постоянны в пределах всей модели
 - заимствованы из свиты Купарук Ривер (Аляска):

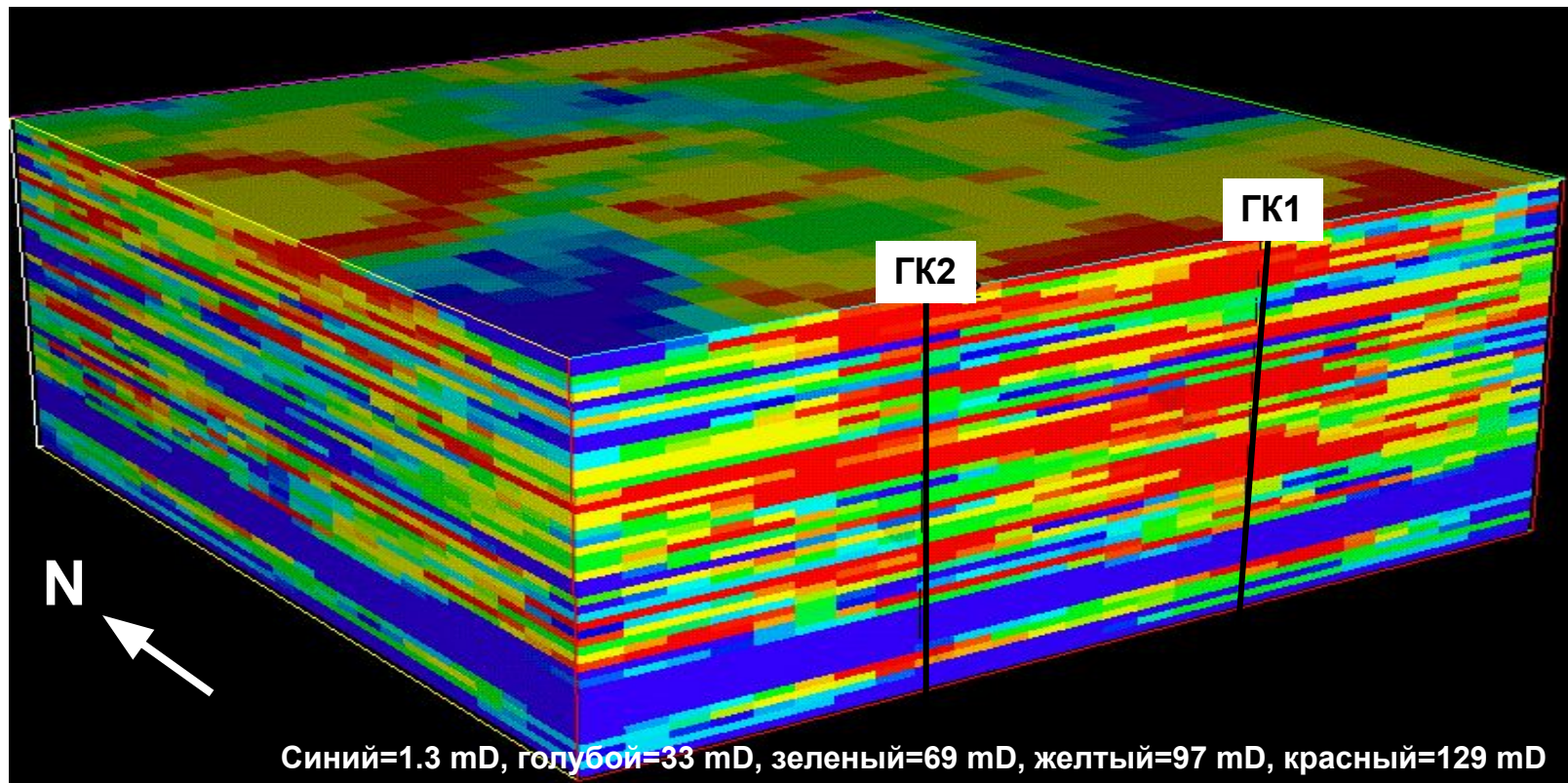
Литотип	Текстуры	Средняя горизонт. прониц-ть., Kh (mD)	Средняя вертикаль. прониц-ть., Kv (mD)	Отношение Kv/Kh	Пористость, ϕ (%)
Песчаник	Хаотично-косослоистые, волнисто-слоистые и флазерные песчаники	129	2	0.17	24
Глина	Линзовидные слоистые или биотурбированные глинистые песчаники и алевриты	1.3	0.04	0.03	0

Огрубленная (upscaled) детерминистская модель проницаемости свиты Грасси



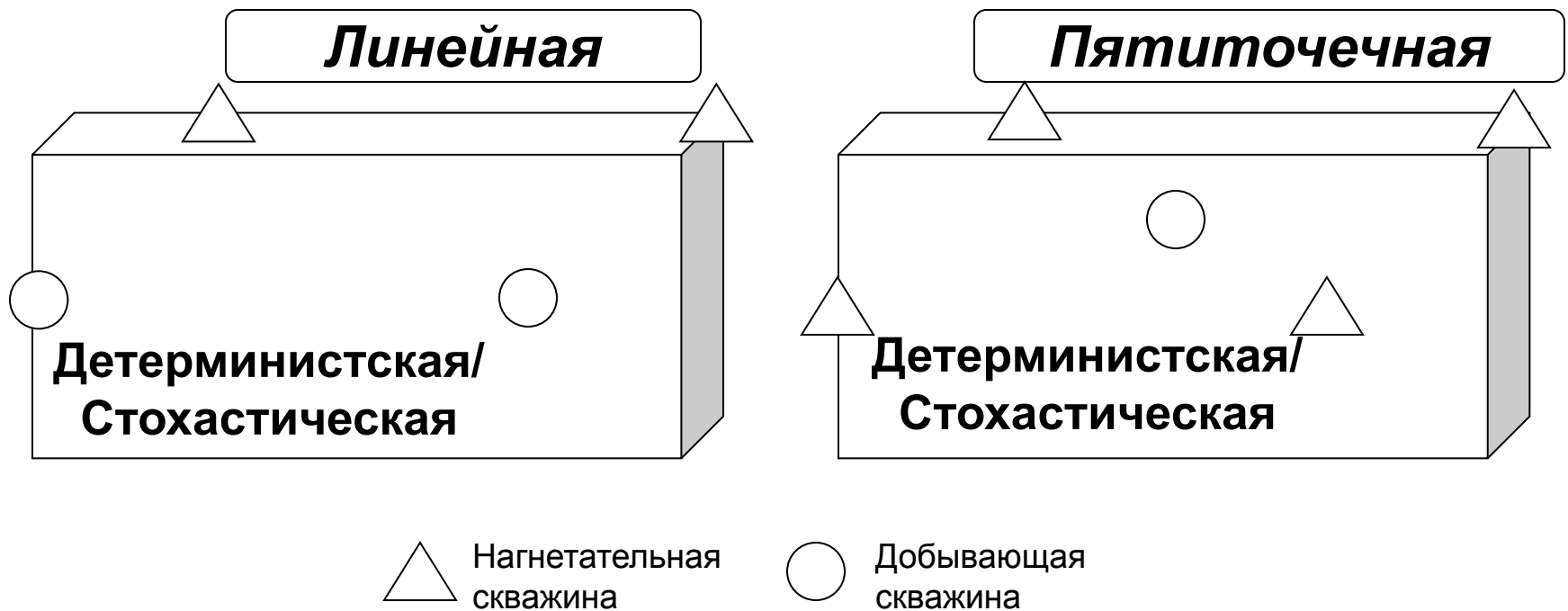
Размер ячеек 30x30x0.6 м (размер ячеек в исходной фациальной модели – 6x6x0.3 м), общее количество ячеек ~34,000 (коэффициент огрубления 50:1). Огрубление произведено методом диагонального тензора.

Огрубленная стохастическая модель проницаемости свиты Грасси



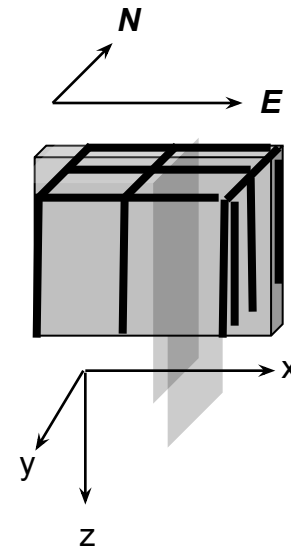
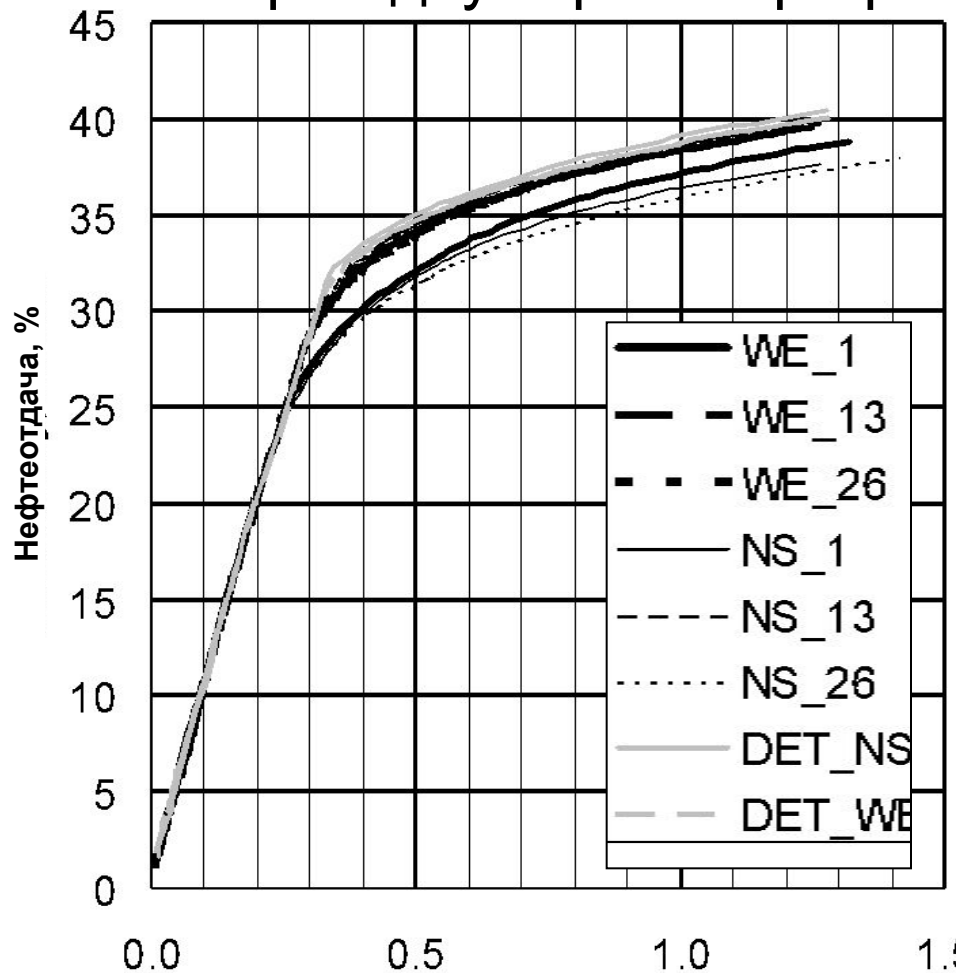
Размер ячей 30x30x0.6 м (размер ячей в исходной фациальной модели – 6x6x0.15 м), общее количество ячей ~34,000 (коэффициент огрубления 100:1). Огрубление произведено методом диагонального тензора

Размещение скважин в модели



Линейная и пятиточечная схема заводнения для созданных детерминистской и стохастической моделей

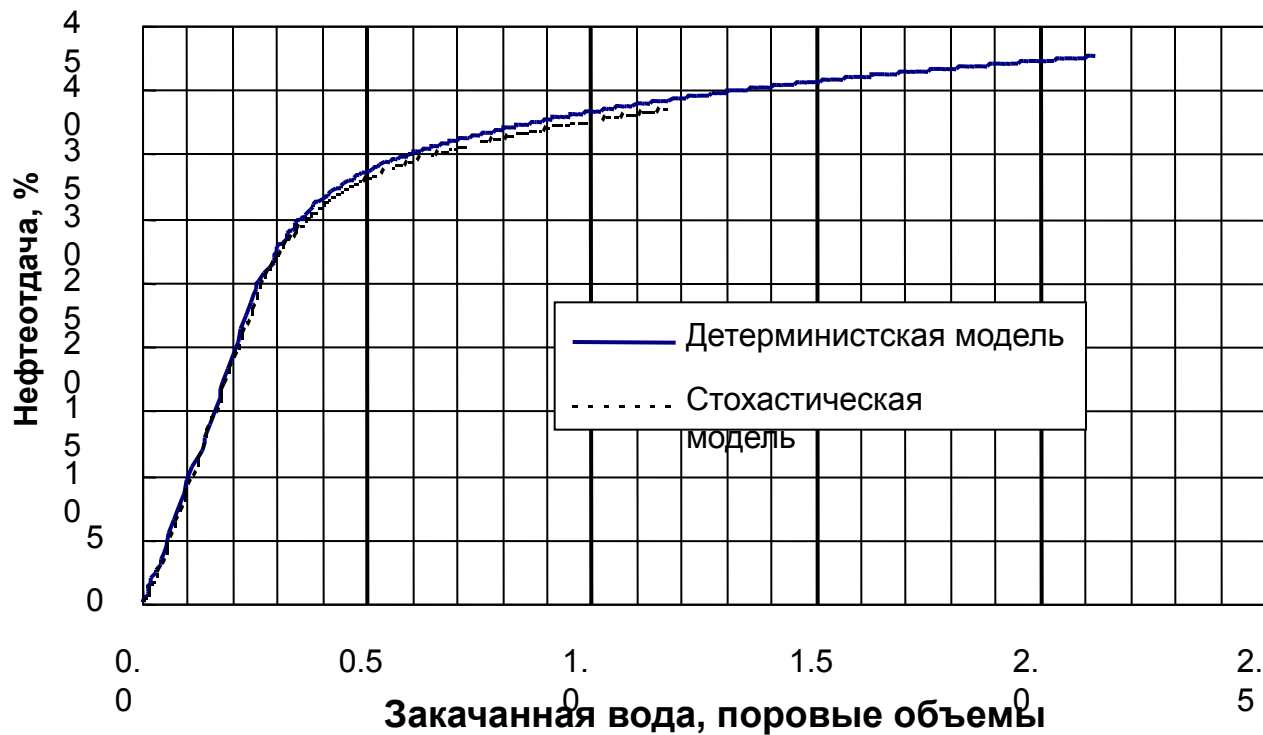
Моделирование разработки при линейном заводнении: серии двумерных профилей



Закачанная вода,
поровые объемы

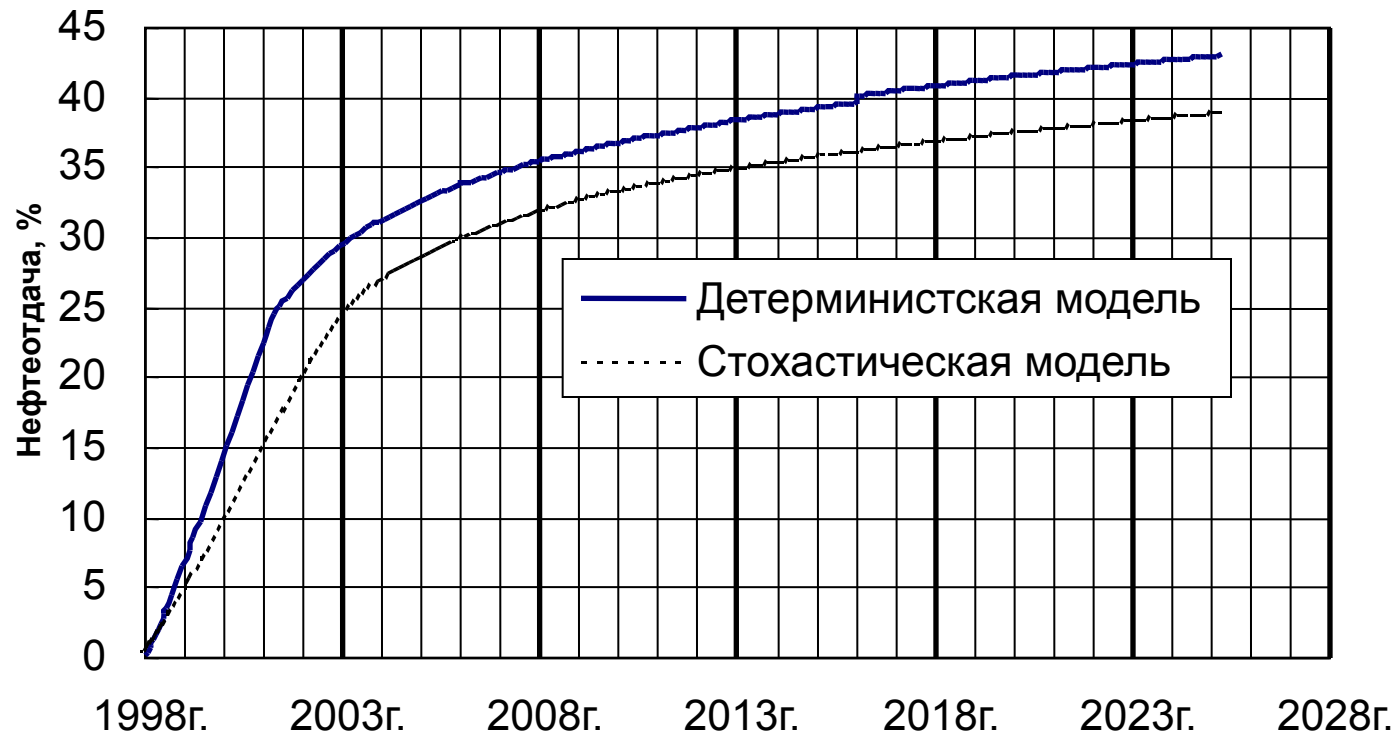
Моделирование нефтеизвлечения при линейной схеме заводнения (обводнение 30%) для серии вертикальных профилей детерминистской и стохастической моделей. На график вынесены кривые для двух профилей детерминистской модели (**DET_NS** и **DET_WE**) и шести профилей для стохастической модели (**WE_1...26**, **NS_1...26**). Детерминистская модель имеет более высокие значения КИН при всех направлениях профилей, демонстрируя большую связность коллекторов.

Моделирование разработки при линейном заводнении в трех измерениях



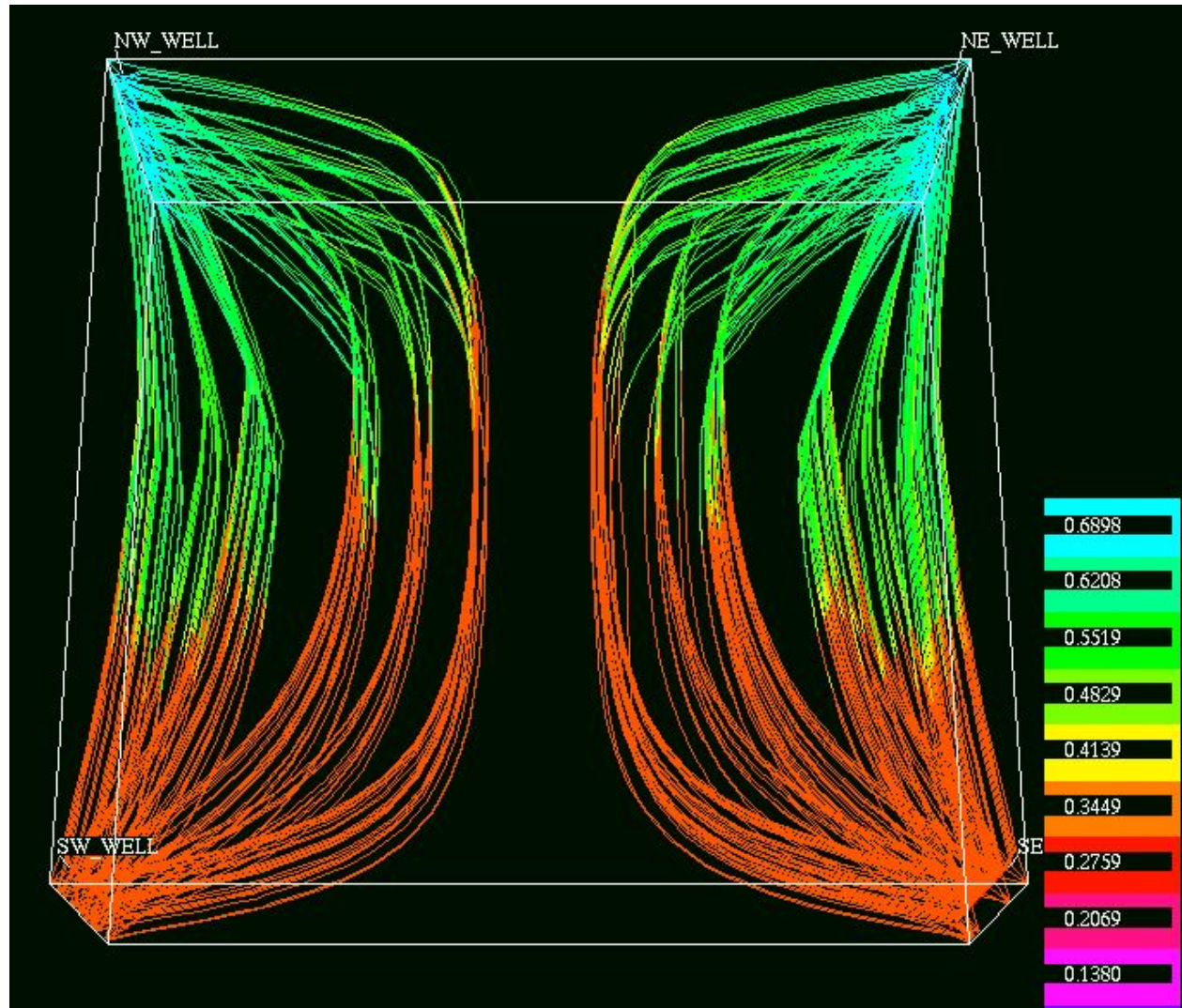
Трехмерное моделирование разработки для свиты Грасси: детерминистская и стохастическая модели демонстрируют весьма близкую динамику КИН.

Динамика нефтеизвлечения



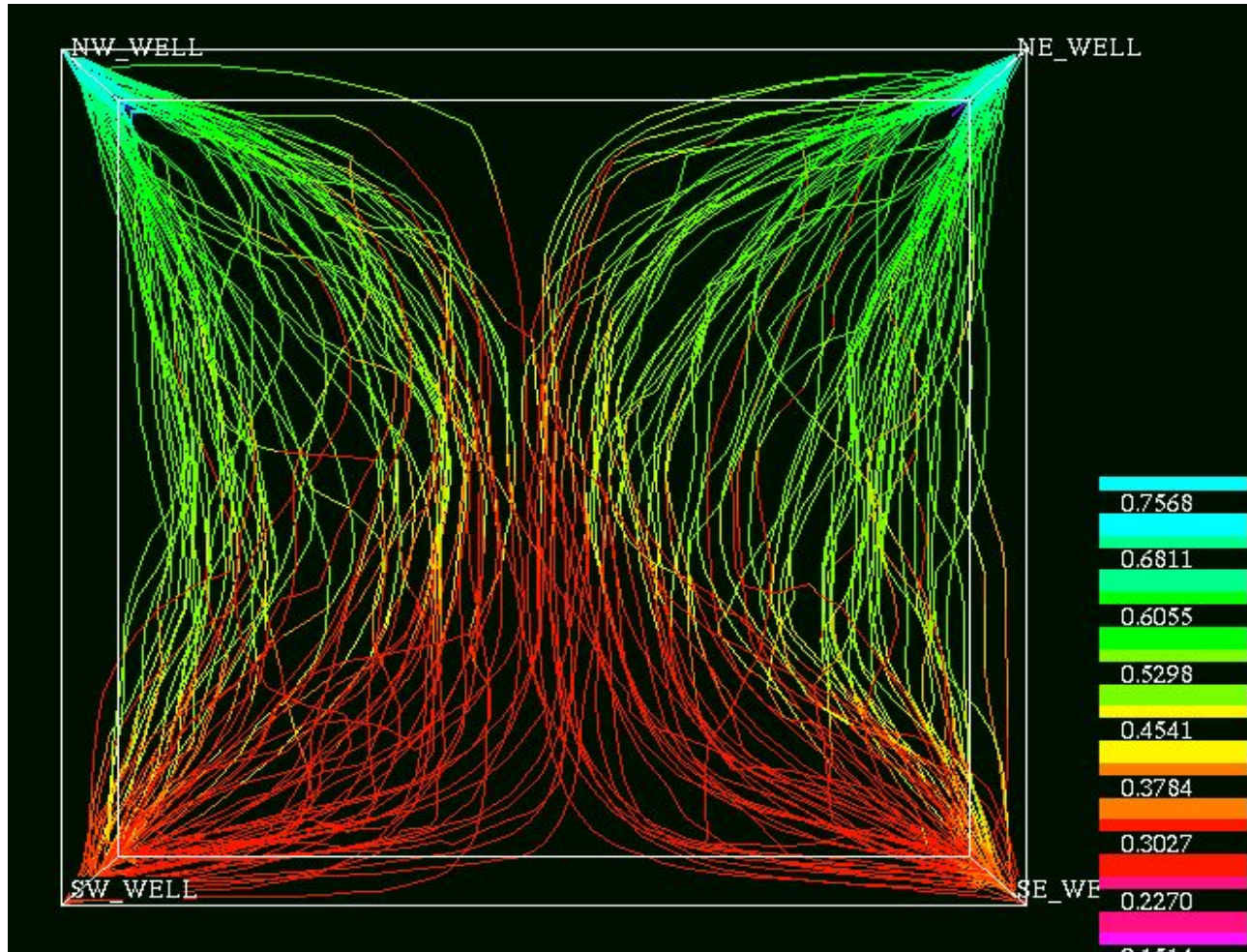
Динамика нефтеизвлечения для детерминистской и стохастической моделей свиты Грасси. Более низкие значения КИН (примерно 4-6%) для стохастической модели объясняются меньшими скоростями заводнения вследствие большей извилистости поровых каналов.

Линии (трубки) тока для детерминистской модели



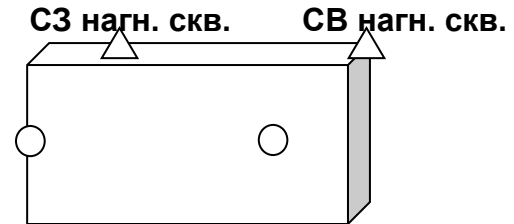
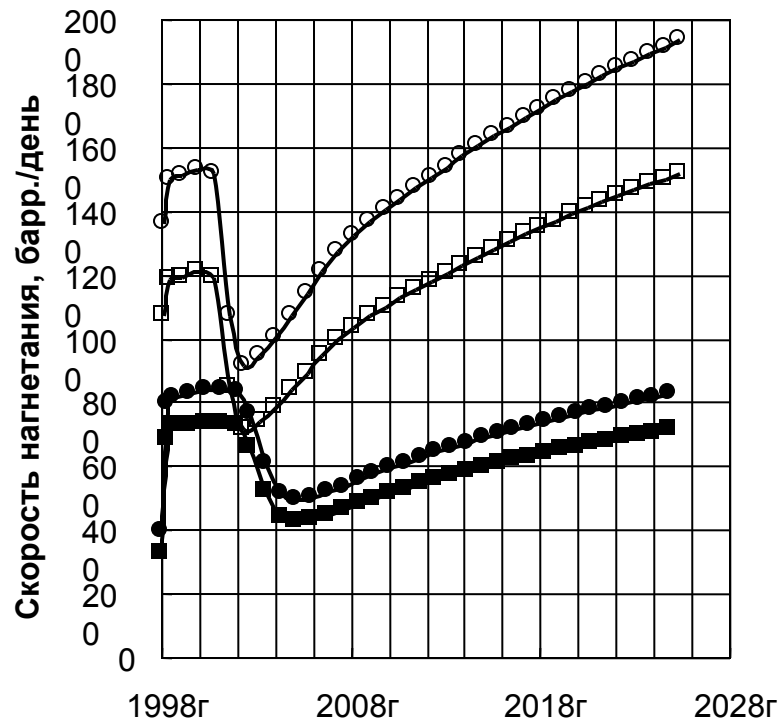
Линии тока для детерминистской модели весьма сглаженные.

Линии тока для стохастической модели



Линии тока, симулированные для стохастической модели, очень извилисты. Нагнетаемый флюид вынужден «обтекать» непроницаемые глинистые тела, охватывая большой объем пород по сравнению с детерминистской моделью.

Динамика нагнетания



- СЗ нагн. скв. – детерминист. модель
- СВ нагн. скв. – детерминист. модель
- СЗ нагн. скв. – стохастическая модель
- СВ нагн. скв. – стохастическая модель

Ожидаемая динамика нагнетания для линейного заводнения для стохастической и детерминистской моделей свиты Грасси. Стохастическая модель демонстрирует значительно более низкие значения скорости нагнетания вследствие большей извилистости «линий тока». Таким образом, если процесс заводнения будет планироваться исходя из детерминистской «версии» (в действительности резервуар безусловно более соответствует стохастической модели), приемлемость нагнетательных скважин будет переоценена на 40-50%. Следовательно, скорость заводнения и длительность эксплуатации месторождения будут существенно отличаться от результатов детерминистской модели

Мелководно-морские песчаники: заключение

- Стохастическая модель демонстрирует больше выгоды при уплотнении сетки бурения, чем детерминистская:
 - увеличение КИН на 0.4% (при пороговом значении обводненности 25%) для детерминистской модели и на 0.6% для стохастической модели
 - Почему стохастическая модель выгоднее при уплотнении?
 - Низкие скорости нагнетания – меньший объем нефти извлечен до уплотнения сетки скважин
 - Уплотнение сетки приводит к более извилистым линиям тока, чем для детерминистской модели

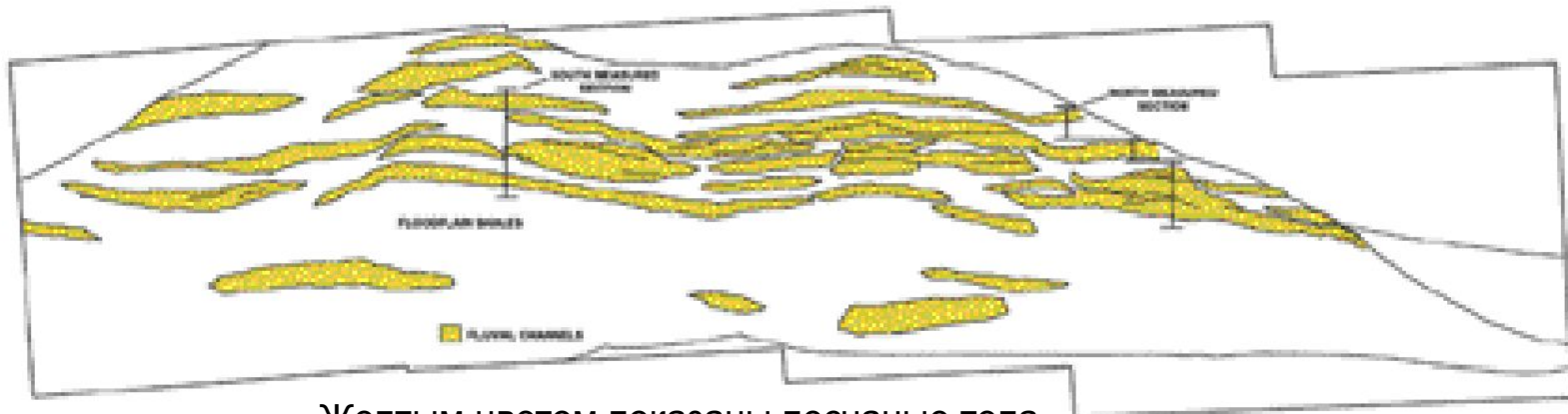
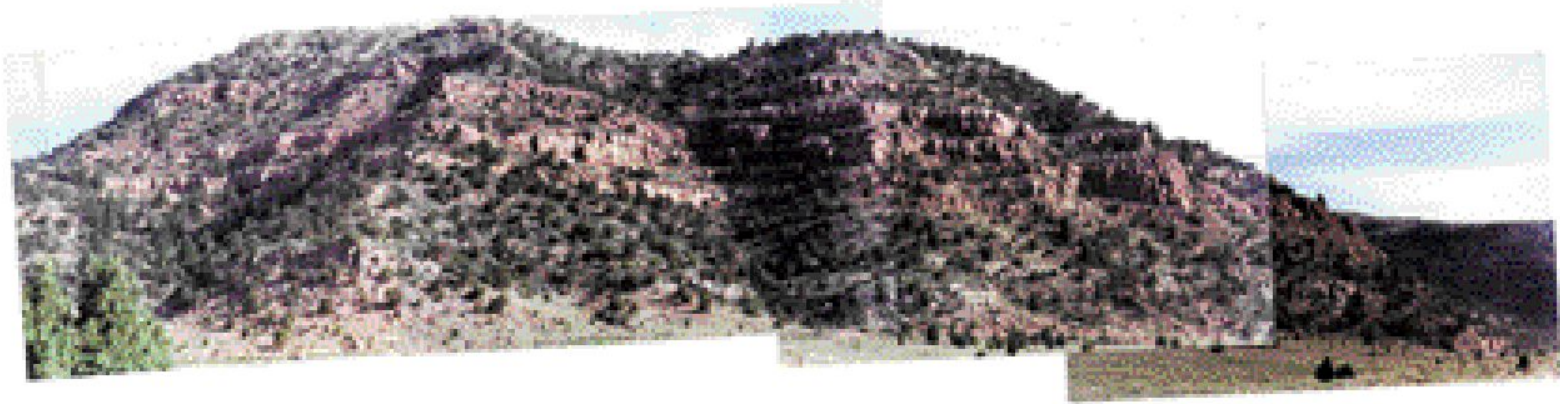
Мелководно-морские песчаники: заключение

- Двумерное (2D) моделирование может привести к переоценке эффекта неоднородности
 - Флюид обтекает препятствия (в двумерной модели кажущиеся непреодолимыми), используя третье измерение
- В любой момент моделируемой разработки разница между КИН для детерминистской и стохастической модели составляет около 4%
 - Существенная разница в загрузке поверхностных сооружений и экономических параметрах разработки
- Большая степень неоднородности стохастической фациальной модели приводит к большей извилистости линий тока флюида (по сравнению с детерминистской моделью):
 - Более низкая проницаемость (в целом для модели)
 - Более низкая продуктивность и дольше срок эксплуатации месторождения
 - Большие значения коэффициента охвата
 - Более низкие значения приемистости нагнетательных скважин (на 40-50% ниже, чем предсказывается детерминистской моделью)

Объект 2: Аллювиальные отложения

- Аллювиальные отложения формации Колтон (палеоцен-эоценового возраста, 65-25 млн. лет назад): речная система с низким градиентом и высокой степенью извилистости русла
- Русловые песчаники и пески разлива (плавни) переслаиваются с алевролитами и глинами прирусловых валов и пойм
- Местонахождение: Найнмайл каньон, Юта (США)
- Два исследованных разреза по 150 м каждый
- **Ключевой момент:** связь между сообщаемостью русловых песчаников и коэффициентом охвата

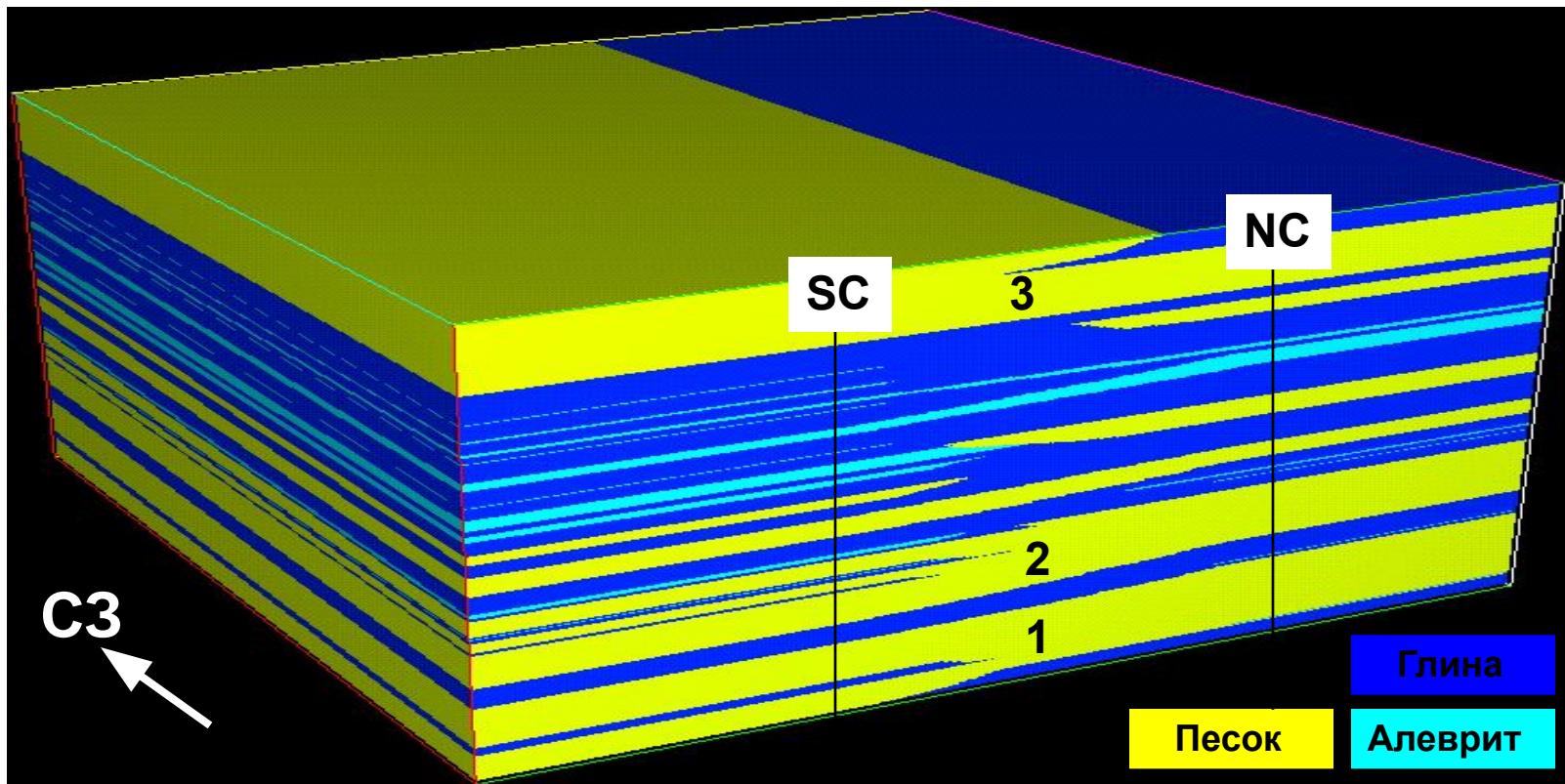
Комплекс аллювиальных отложений формации Колтон, Найнмайл каньон, Юта



Желтым цветом показаны песчаные тела

Аллювиальный комплекс состоит из отложений побочней, заполнения русел, заполнения промоин береговых валов (crevasse channel) и песков разлива (плавней). Пойменные алевритистые глины разделяют эти песчанистые тела по вертикали (в разрезе) и по горизонтали (латерально).

Детерминистская фациальная модель формации Колтон



Для удобства моделирования все фациальные типы объединены в три группы (литотипа):

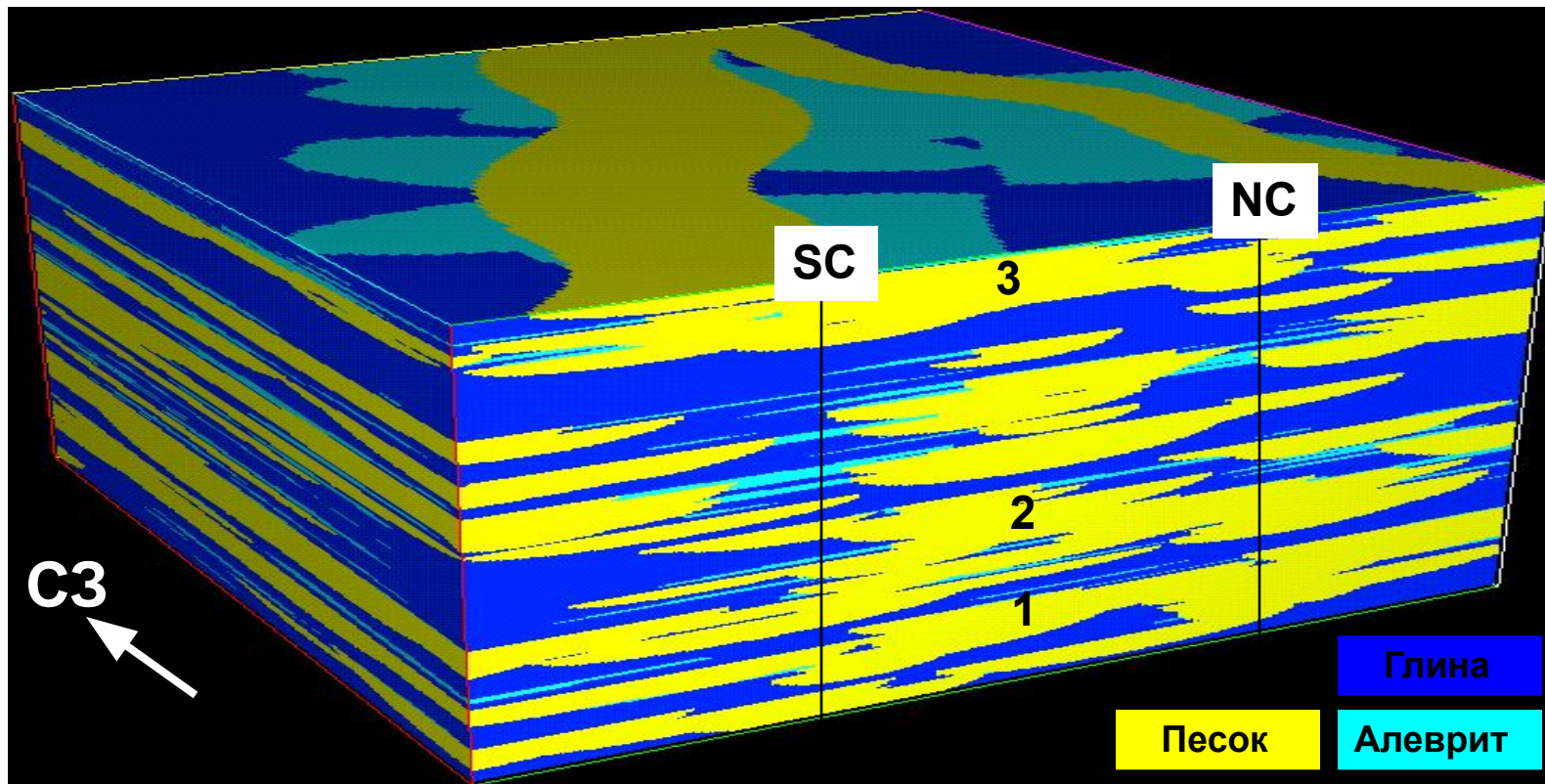
1) **пески** (побочни, заполнения русел и промоин прирусловых валов) ~51% объема,
2) **алевриты** (плавни) 8%, и 3) пойменные **глины** – 41%.

Большая часть геологических тел (как песков, так и глин) в этой модели представляется непрерывными (цифрами обозначены главные «коллектора»). Корреляция проведена по двум разрезам (**SC** и **NC**). Модель состоит из 8.1 млн. ячеей (130x130x478; каждая 6x6x0.3 м) и имеет размер 780x780x143 м

Стохастическая модель

- Объектно-ориентированное моделирование тел «продуктивного комплекса» (русловые тела и связанные с ними пески разлива), расположенных в «матриксе» пойменных глин
- Результат: подобно детерминистской модели, получилось три выдержанных по простиранию русловых системы
- **Отличия от детерминистской модели:** в центральной части «появились» разрозненные русловые тела, отсутствующие прежде

Стохастическая фациальная модель формации Колтон



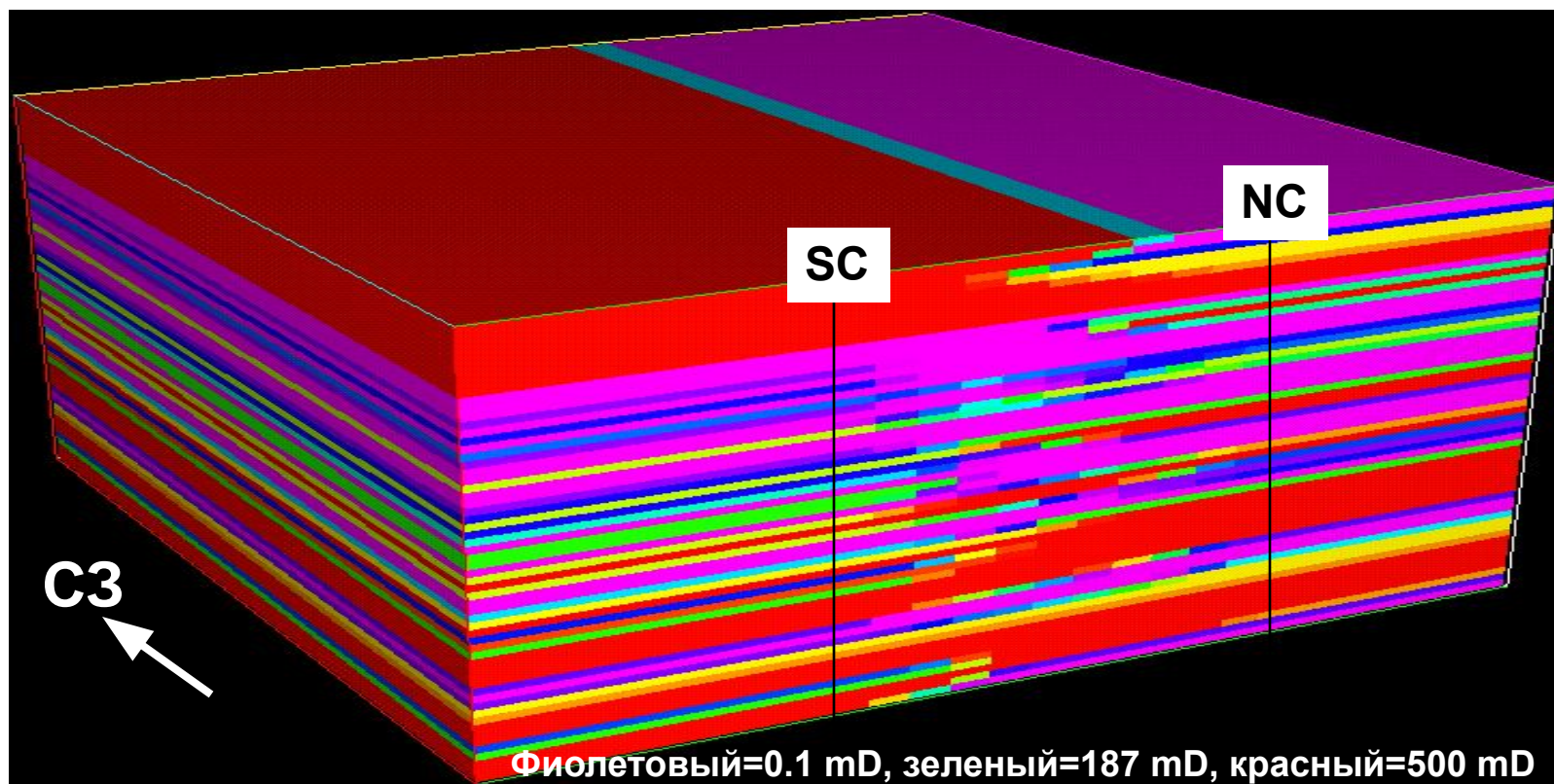
Как и в прежней модели, выделяются три основных связанных системы песчаных тел (обозначены цифрами). Тем не менее, эти системы гораздо менее выдержаны по латерали (особенно – система 2), чем в детерминистской модели. Модель состоит из 8.1 млн. ячеек (130x130x478; каждая 6x6x0.3 м) и имеет размер 780x780x143 м

Пористость и проницаемость

- Каждому литотипу присвоены значения пористости и проницаемости:
 - Не изменяются в пределах модели
 - Типичны для аллювиальных отложений Мексиканского залива

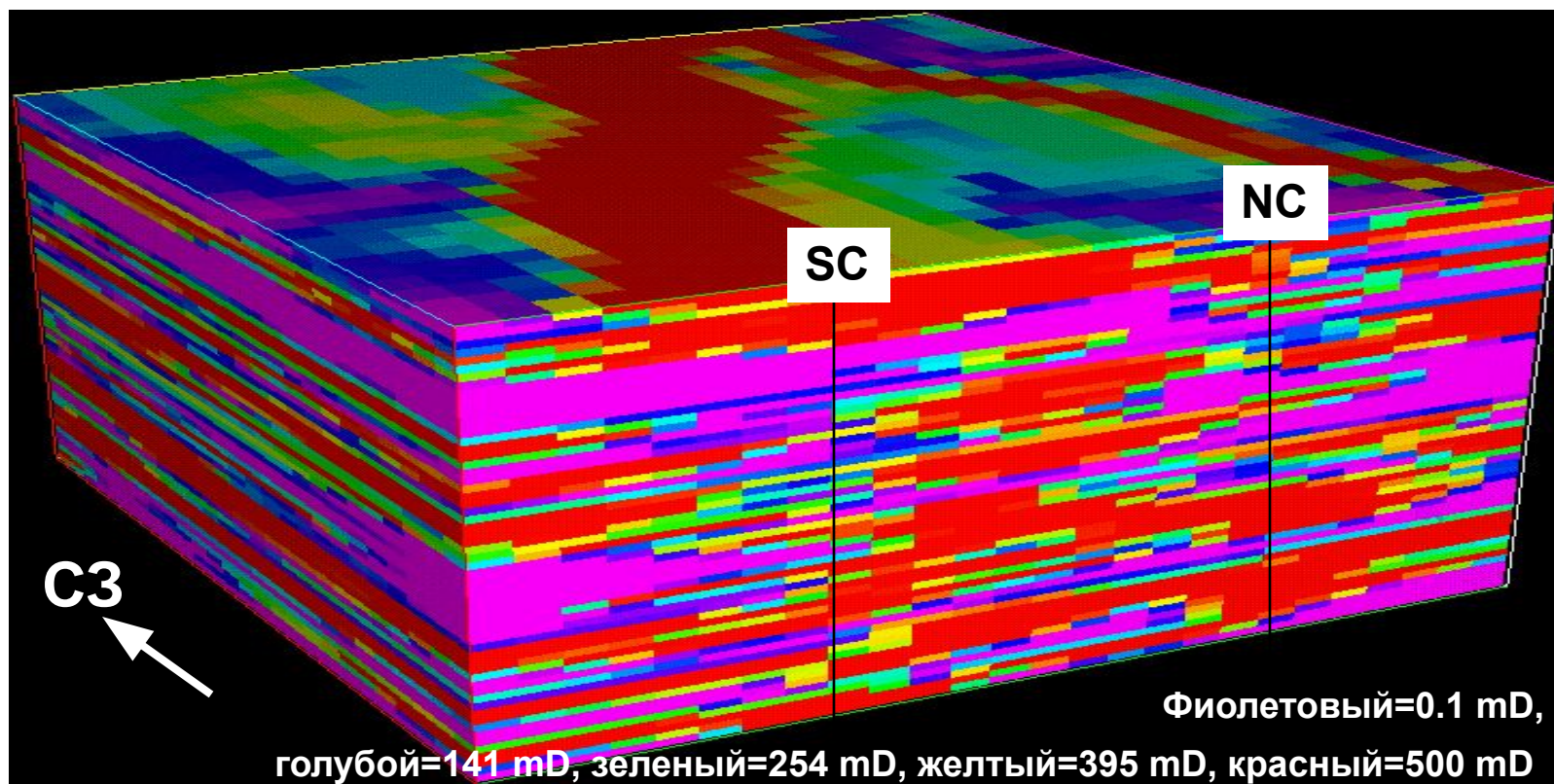
Литотипы	Пористость, (%)	Проницае- мость, (mD)
Русловые пески (побочни и заполнения каналов)	27	500
Алевриты разлива (плавни)	20	10
Пойменные глины	0	0.1

Огрубленная детерминистская модель проницаемости формации Колтон



Размер ячей 30x30x2.4 м (исходный размер – 6x6x0.3 м); общее количество ячеек ~40 000 (коэффициент огрубления 200:1).
Использован метод диагонального тензора.

Огрубленная стохастическая модель проницаемости формации Колтон



Огрубленная стохастическая модель проницаемости. Размер ячеек 30x30x2.4 м (исходный размер – 6x6x0.3 м); общее количество ячеек ~40 000 (коэффициент огрубления 200:1). Использован метод диагонального тензора.

Размещение скважин в модели

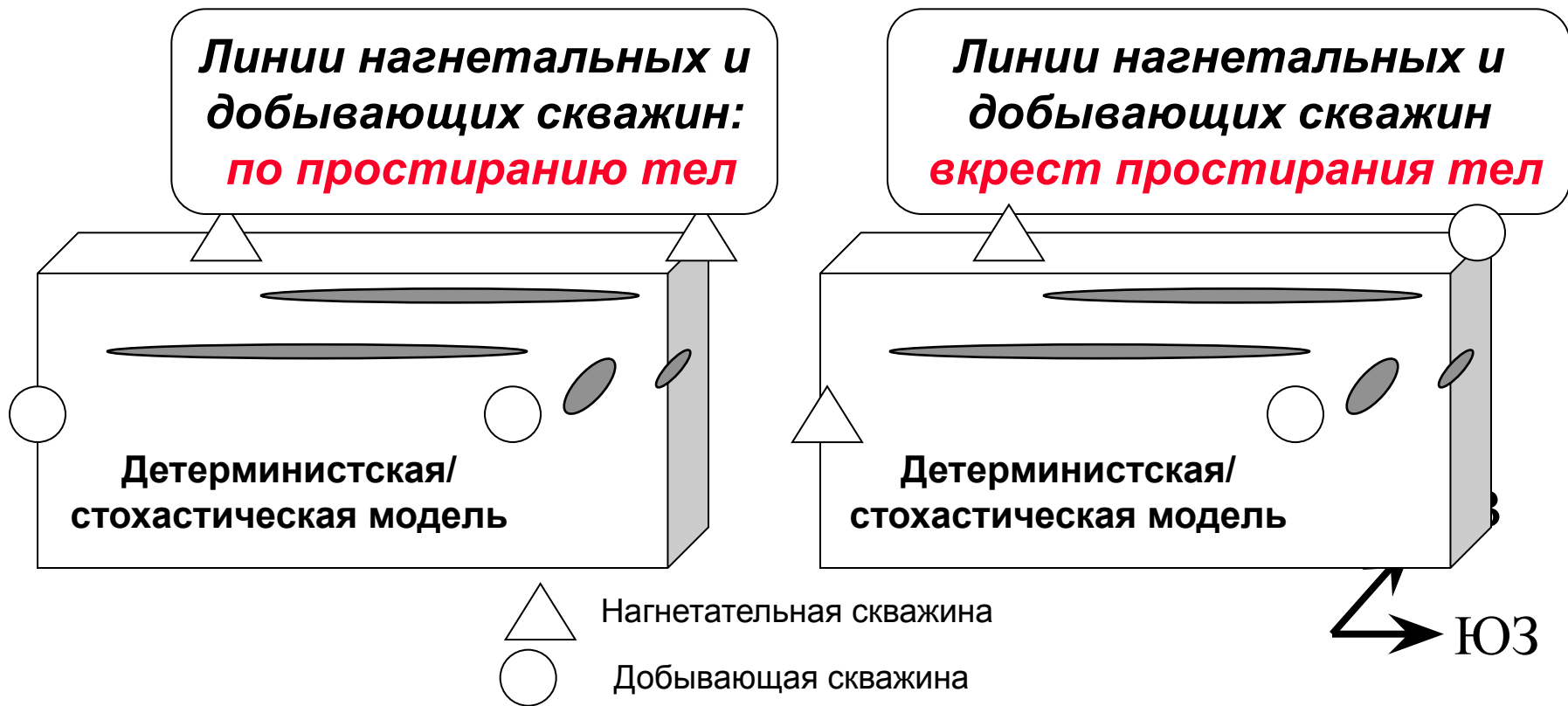
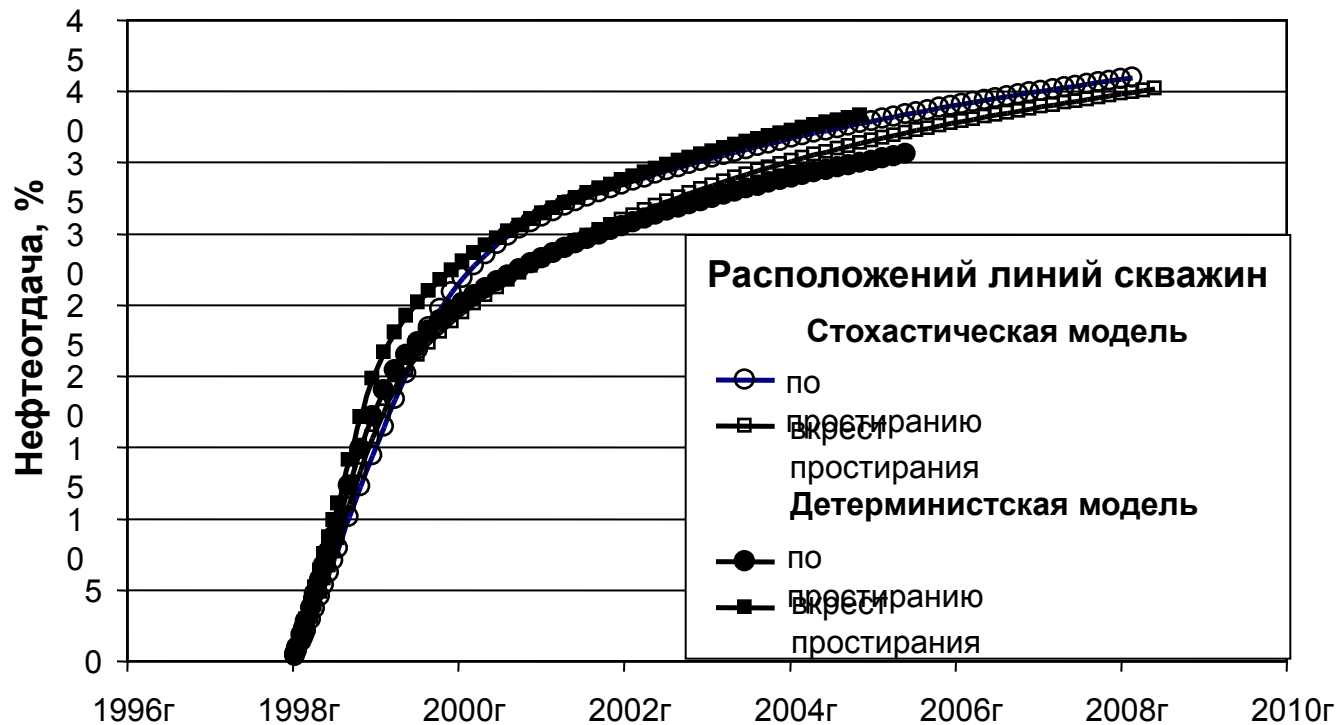


Схема размещения линий скважин при моделируемом линейном заводнении. Для каждой из моделей (детерминистской и стохастической) рассматривались два случая: 1) с размещением линий скважин по простиранию геологических тел и 2) вкrest простирания геологических тел.

Моделирование разработки

(пороговое значение обводненности 30%)



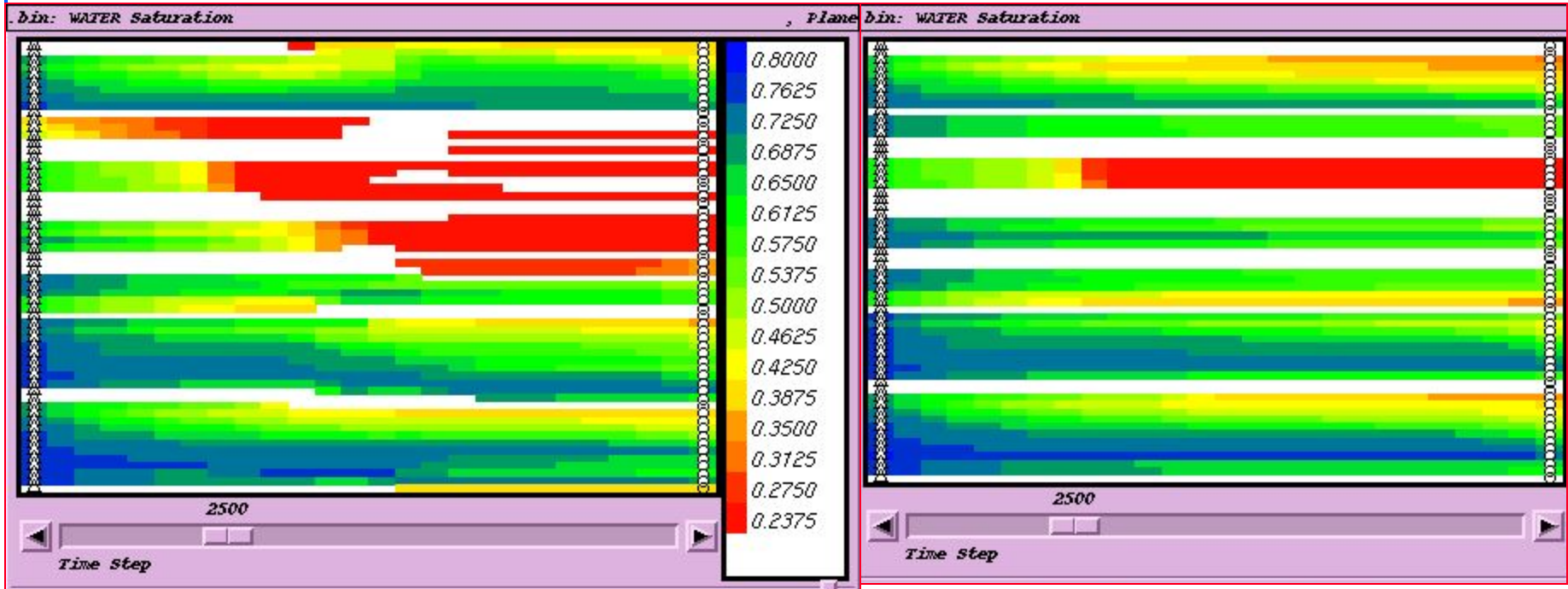
Положение линий скважин	КИН, %	
	Стохастическая модель	Детерминистская модель
По простиранию	40.	35.
Вкрест простирания	40.	38.

Моделирование разработки при линейном заводнении: четыре варианта. Для детерминистской модели расположении линий нагнетающих и добывающих скважин **вкрест простирания** сопровождается большими значения нефтеотдачи (продуктивные тела имеют большую протяженность по простиранию), чем при расположении **по простиранию**. Для стохастической модели более продуктивным оказывается расположения скважин **по простиранию** – линии тока при заводнении весьма извилисты, что увеличивает **коэффициент охвата**.

Водонасыщенность детерминистской модели (при обводненности добываемого флюида 30%)

*Линии скважин ориентированы
по простиранию*

*Линии скважин ориентированы
вкрест простирания*

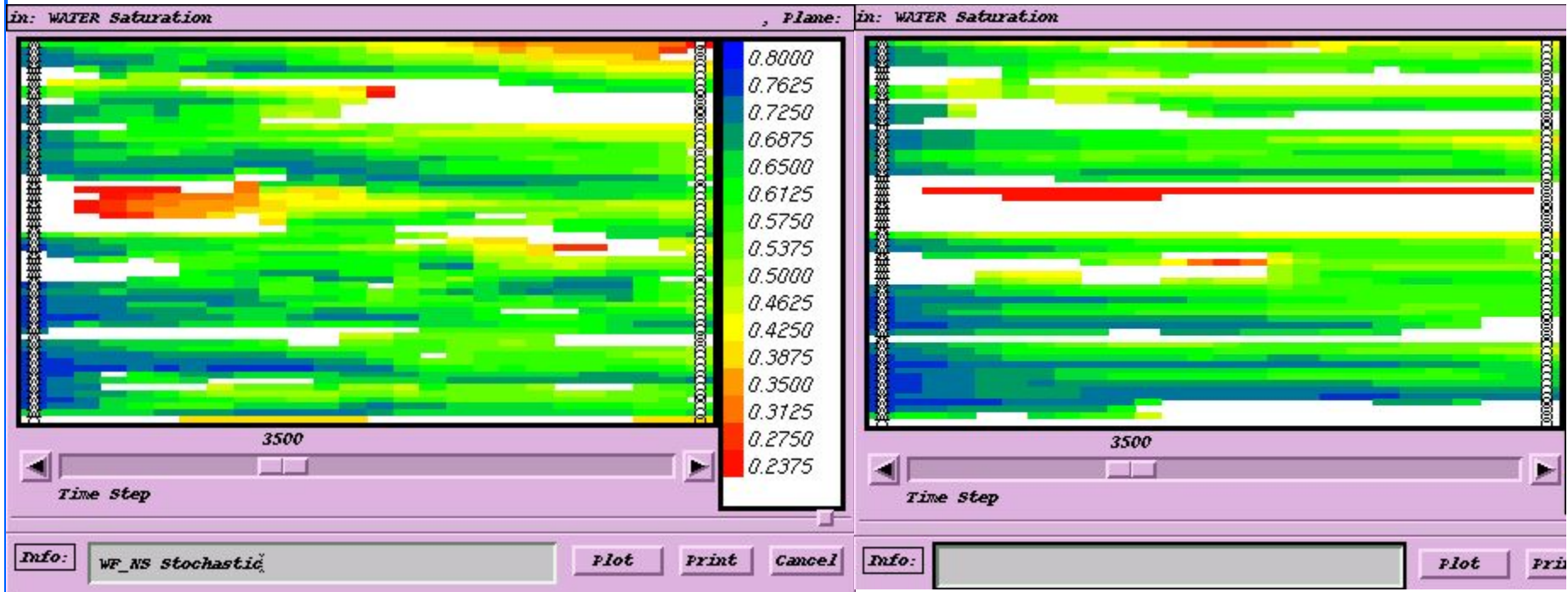


Для водонасыщенности добываемого флюида 30% (конец моделирования) при расположении линий скважин **по простиранию** (слева) остаются большие объемы «непромытого» коллектора (отмечены красным). При положении линий скважин вкрест простирания доля нефтенасыщенных песчаников существенно ниже. Белым цветом отмечены непроницаемые глинистые пропластки.

Водонасыщенность стохастической модели (при обводненности добываемого флюида 30%)

*Линии скважин ориентированы
по простиранию*

*Линии скважин ориентированы
вкрест простирания*



При тех же условиях «конечной» обводненности добываемого флюида для стохастической модели более продуктивным оказывается расположение линий скважин **по простиранию** тел (слева).

Интенсивность добычи

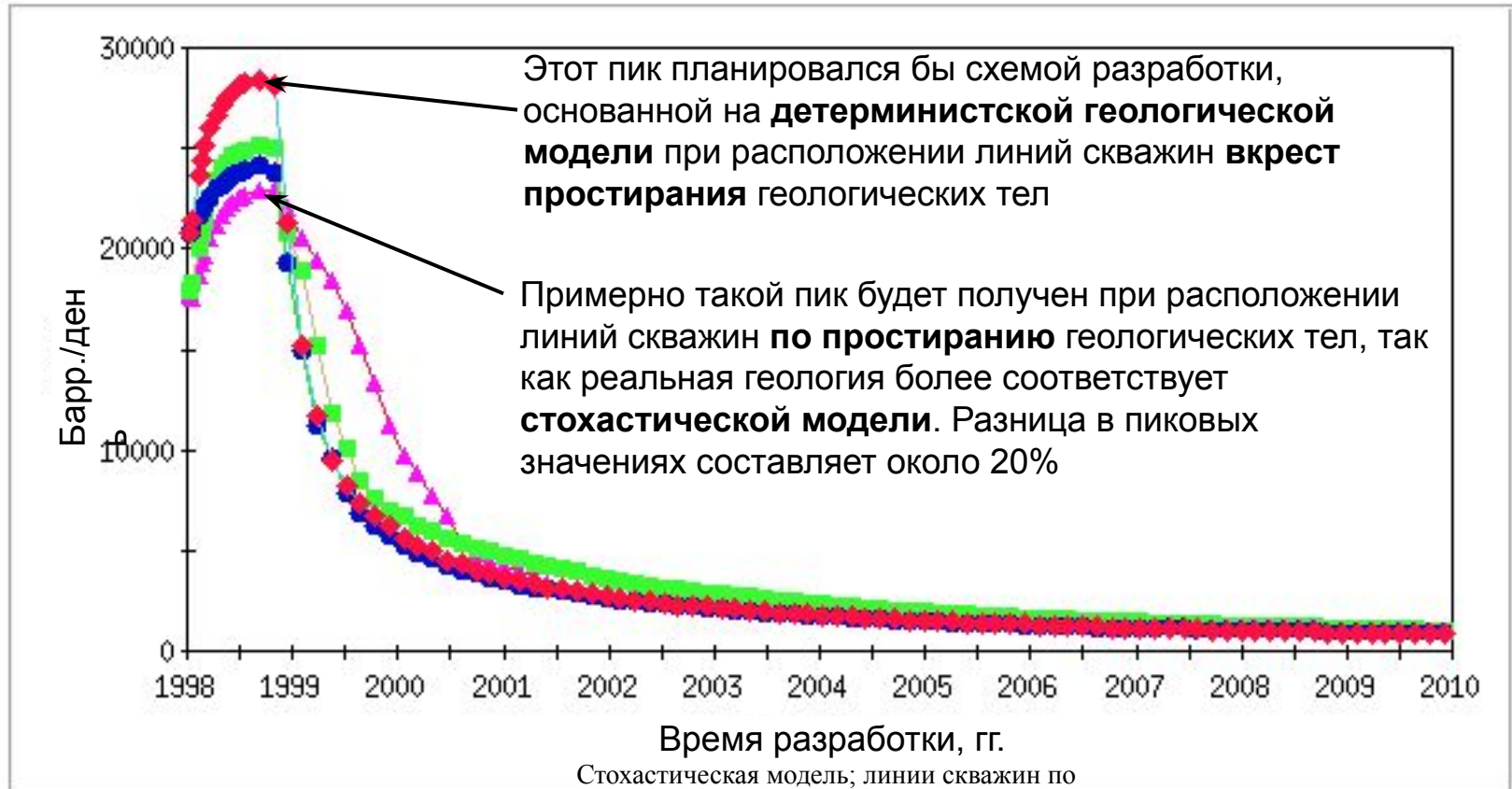


Диаграмма отражает динамику нефтедобычи для детерминистской и стохастической моделей при различном расположении линий скважин.

В целом, накопленная добыча во всех четырех случаях имеет сравнимые значения. Однако детерминистская модель демонстрирует высокий «ранний» пик и быстрый спад интенсивности добычи после начала обводнения добываемого флюида, тогда как стохастическая модель предполагает более низкие (на 15-20%) пиковые значения и меньшие скорости обводнения.

- ◆— Стохастическая модель; линии скважин вкрест простирания
- Детерминистская модель; линии скважин по простиранию
- ◆— Стохастическая модель; линии скважин по простиранию
- Детерминистская модель; линии скважин вкрест простирания

Аллювиальные отложения: выводы

- **Детерминистская модель:** более высокие значения нефтеизвлечения достигаются при расположении линий нагнетающих и добывающих скважин вкрест простирания русловых тел (большая протяженность коллектора по простиранию русла).
- **Стохастическая модель:** выгоднее расположение линий скважин по простиранию русла (более высокие значения коэффициента охвата).
- Накопленная добыча для обеих моделей практически не различается. Тем не менее, выбор детерминистской модели и (игнорирование стохастической) означает технологические ошибки при разработке и неизбежные экономические потери

Общие выводы

- Точное описание резервуара критически важно для создание реалистичной трехмерной гидродинамической модели
- Важнейшие этапы создания модели:
 - определение неоднородностей резервуара (каротаж, керн и т.д.)
 - Учитываются неоднородности, влияющие на течение флюида и существенны для выбора схемы и режима разработки
 - определение размера, количества и ориентировки геологических тел (коллекторов и покрышек)
 - Данные могут быть получены при изучении обнажений соответствующих отложений
 - выбор наиболее приемлемой процедуры геологического моделирования (детерминистская? стохастическая – какая?)
 - Обычно используется «гибридный» подход с детерминистски («вручную») заданными поверхностями (обычно – кровля и подошва продуктивного интервала, очерчиваемые сейсмикой) и стохастической моделирование продуктивного интервала
 - применение критерия эффективности заводнения для оценки моделей
 - Особенно полезен график интенсивности добычи
- В целом, двумерное моделирование не должно использоваться для определения эффекта неоднородности... Следует использовать трехмерное моделирование

Благодарности

G.C. Gaynor, D. Swauger и G. Wilson участвовали в экспедиционных работах при сборе материала мелководно-морских отложений Грасси

Автор благодарен управлению ARCO Technology and Operations Services за разрешение опубликовать результаты этих исследований