

Distinguished Lecturer Program

Основное финансирование предоставляется SPE через Фонд добровольных взносов членов организации и финансового участия Offshore Europe

Общество выражает благодарность компаниям, которые предоставляют своих специалистов для участия в данной программе в качестве лекторов

Дополнительная поддержка - со стороны Американского института инженеров горной промышленности



Общество инженеров-нефтяников
Программа Заслуженный Лектор SPE
www.spe.org/dl

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

Distinguished
Lecturer Program

Field-based connectivity predictions without simulation



Прогнозирование связности пластов по промысловым данным без применения моделирования

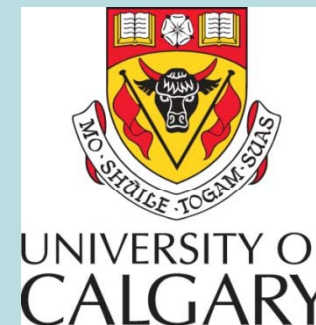
Джерри Л. Дженсен

Университет Калгари,
Факультет химических и нефтегазовых
технологий, геолого-геофизических
исследований

Jerry L. Jensen

Departments of
Chemical and Petroleum Engineering
Geosciences
University of Calgary

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



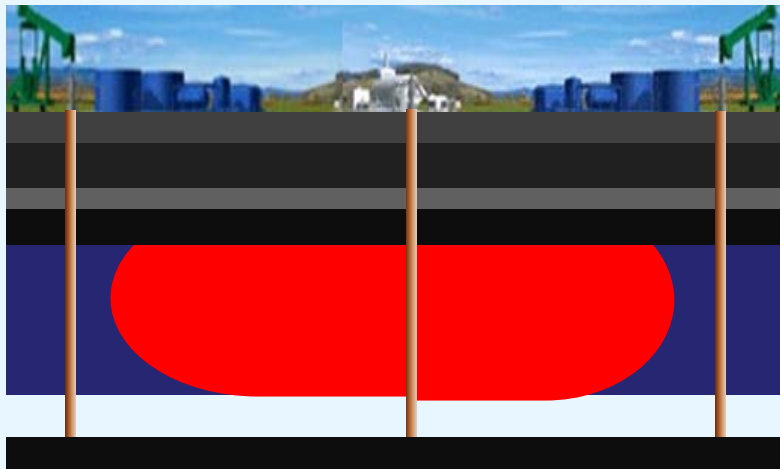
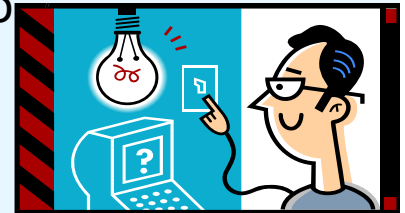
Why bother with connectivity?

Зачем нам связность?

Connectivity is everywhere!

Связность – везде!

- We depend on connections Мы зависим от всякого рода связей
 - Flip switch & lights come on - Щелкнули выключателем и зажгли свет
 - Drive & get to destination - Сели в машину и добрались до места назначения
- We also need reservoir connections
- Нам также необходима информация о внутренней СВЯЗНОСТИ ПЛАСТОВ



70 years' of connectivity

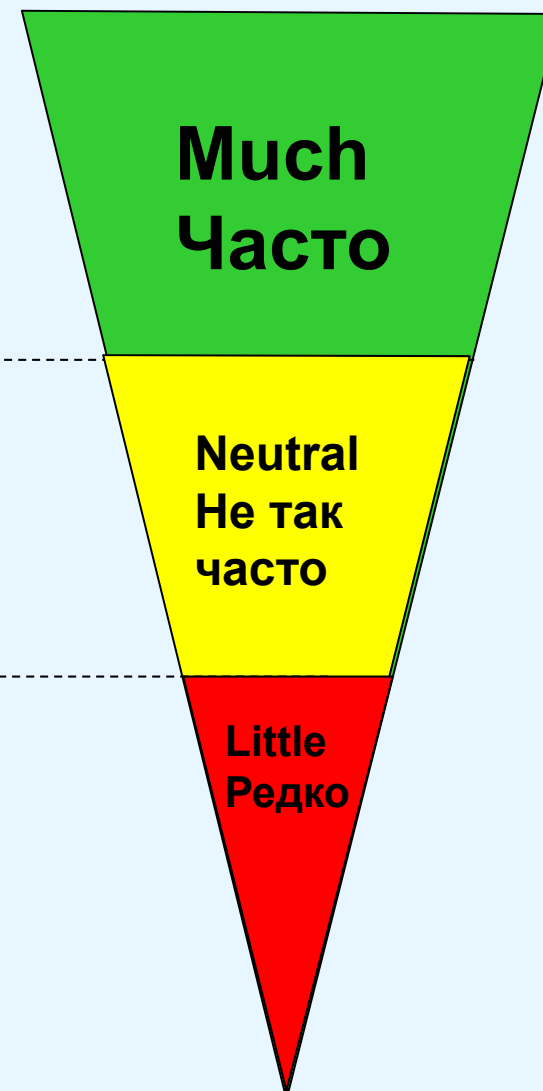
70 лет истории изучения связности

- “...discontinuous **variations in permeability**...provide the explanation for large variations in production capacities frequently observed...” (Muskat, 1937)
- “Detailed knowledge of sand-channel ... **stacking and connectedness** are essential ... within fluvial systems.” (Henriquez et al, 1990)
- “**Connectivity** represents one of the fundamental properties of a reservoir that directly affects recovery.” (Larue and Hovadik, 2006)
- “...Внезапные **изменения проницаемости** позволяют объяснить причины значительных изменений добычи, которые часто наблюдаются на практике...” (Muskat, 1937)
- “Нам необходимы точные сведения о системах **накопления и внутренней связности** русловых песчаников ... в речных системах осадконакопления.” (Henriquez и др., 1990)
- “**Связность** есть одно из фундаментальных свойств коллектора, от которого напрямую зависит коэффициент извлечения.” (Larue и Hovadik, 2006)

Many names for connectivity!

Различные способы описания связности!

- | | |
|-------------------------|---|
| • Thief zones | Зоны поглощения,
низкого давления |
| • Bypassed regions | Целики, неработающие пласты |
| • Connectedness | Связность |
| • Continuity | Выдержанность, непрерывность |
| • Communication | Связь |
| • Conductivity | Проводимость |
| • Tortuosity | Извилистость |
| • Compartmentalization | Расчлененность по вертикали,
вертикальная связность пласта |
| • Barriers | Барьеры проницаемости |
| • Flowpath obstructions | Препятствия на пути движения
флюида |



Connectivity prediction methods

Методы прогнозирования связности

- Static
 - Do not need flow
 - Examples
 - Averaging core data
 - Percolation
 - Geometrical
- Dynamic
 - Use flow data from improved recovery processes
 - Examples
 - Breakthrough time
 - Tracer analysis
 - Capacitance model
 - Multi-well productivity index
- Статические
 - Не требуют данных добычи
 - Примеры
 - Осреднение данных анализа керна
 - Фильтрация
 - Анализ геометрических параметров
- Динамические
 - Используют данные интенсификации добычи
 - Примеры
 - Время прорыва воды или газа
 - Анализ с применением радиоактивных изотопов
 - Построение емкостной модели
 - Оценка показателя продуктивности нескольких скважин

Connectivity applications

Связность пласта: области применения

- **Model assessment**
 - screen geostatistical realizations
 - compare competing geological models
 - assess impact of geological characteristics
- **Field management**
 - screen data
 - adjust injection and production rates
 - identify & risk drilling strategies
 - assess need/effectiveness of remedial measures
 - calibrate fluid flow simulation models
- **Оценка модели**
 - Выборка геостатистических реализаций моделей
 - Сравнение равнозначных геологических моделей
 - Оценка влияния геологических характеристик
- **Контроль разработки месторождения**
 - Выборка данных
 - Корректировка дебитов добычи и нагнетания
 - Планирование буровых работ и оценка рисков бурения
 - Оценка необходимости и эффективности ремонтных работ
 - Уточнение моделей фильтрации флюида

Many things affect connectivity in geological systems

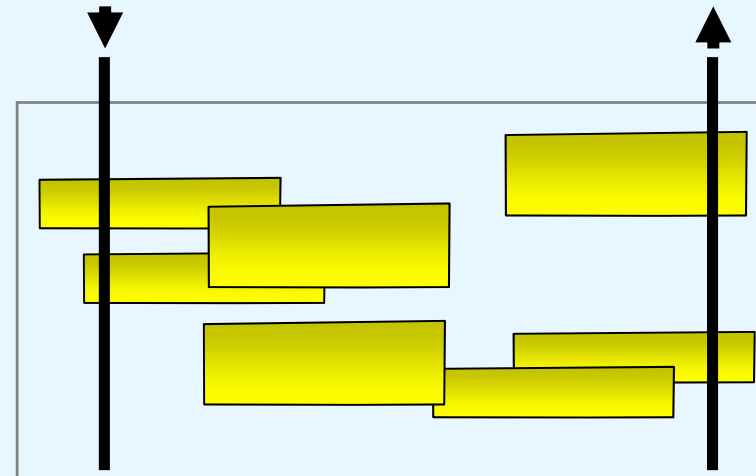
Связность внутри геологических систем зависит от многих факторов

- **System properties**

- Size
- Dimensionality 2D or 3D

- **'Sand' properties**

- Amount (net-to-gross)
- Size
- Orientation
- Aspect ratio
- Configuration
 - Side by side
 - Overlapping



- **Свойств геологических систем**

- Размера
- Размерности (2D или 3D)

- **Свойств продуктивных пластов**

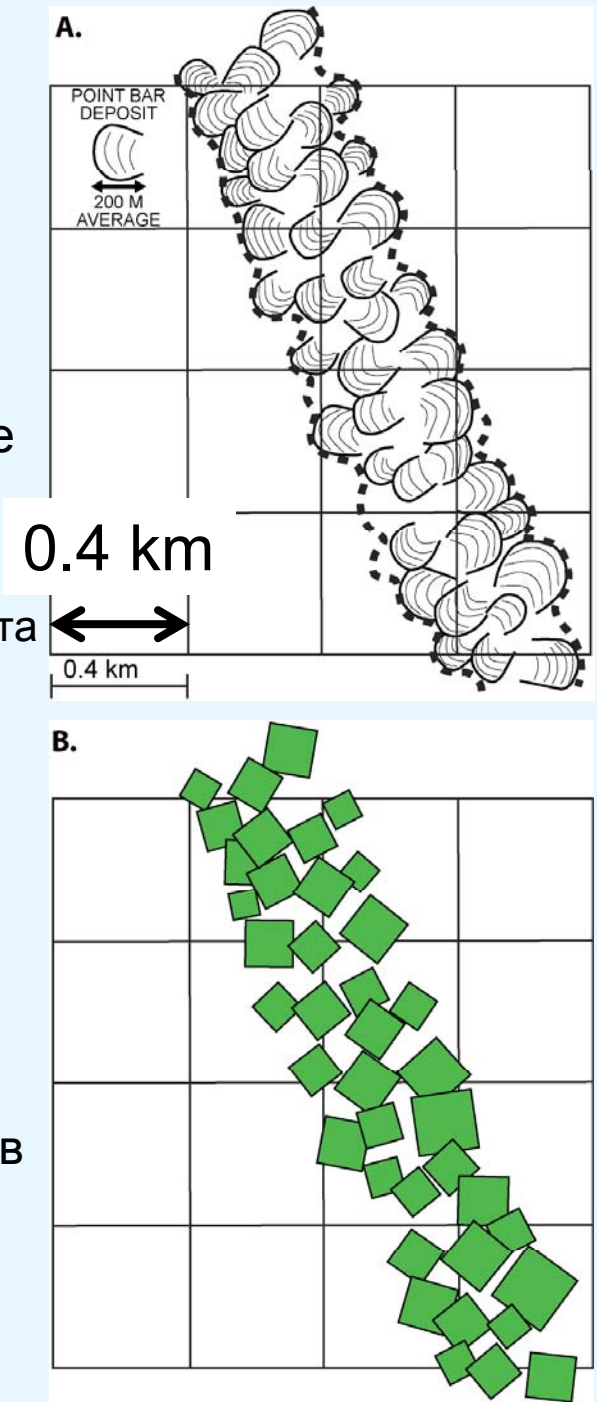
- Песчанистости
- Мощности
- Пространственного положения/ориентации
- Соотношения размеров
- Характера залегания

- Параллельно / на одном стратиграфическом уровне
- Трансгрессивно / на разных стратиграфических уровнях

Geosystems and percolation

Геологические системы и фильтрация

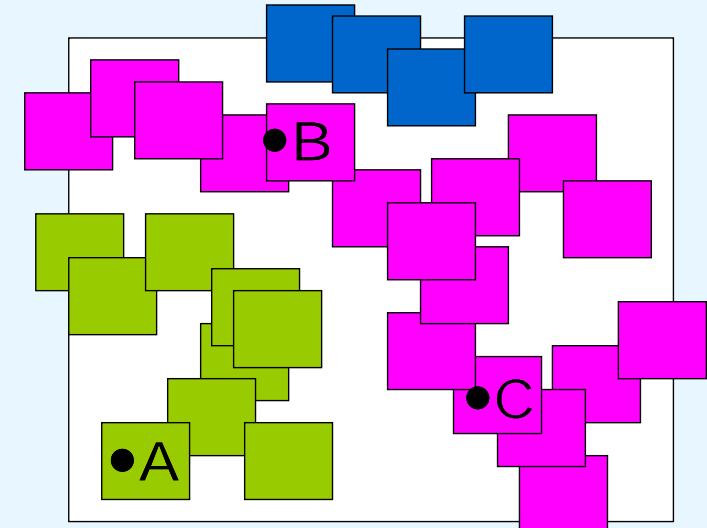
- Percolation = connectivity of random systems
 - Began in 1940's
 - Many applications
 - Traffic
 - Forest fires
 - Fluid flow
- Reservoir systems have unpredictable aspects
 - Sizes and orientations
 - Clusters vs dispersed
- Фильтрация = связность случайных систем
 - Начало изучения – 1940-е годы
 - Области применения
 - Движение автотранспорта
 - Лесные пожары
 - Фильтрация флюидов
- Системы продуктивных пластов непредсказуемы по многим параметрам:
 - Размерам и залеганию
 - Формированию групп или индивидуальных объектов



Percolation is about connection

Обсуждая теорию фильтрации, мы говорим о связности

- **Two wells in sand not enough**
 - A and B disconnected
 - B and C connected
- **Percolation theory tells us**
 - Probability of wells in same cluster
 - Fluid travel time between wells
- **Easy and fast to calculate**
- **Assumptions often include**
 - Sand geometries
 - Two rock types
 - Unit mobility process (travel time)



- **Двух скважин на один песчаный интервал недостаточно**
 - A и B не имеют связи
 - B и C связаны между собой
- **Теория фильтрации говорит нам о:**
 - Вероятности бурения скважин на одну группу объектов
 - Времени движения флюида между скважинами
- **Рассчитывается легко и быстро**
- **Предположения часто включают**
 - Геометрию песчаных тел
 - Два типа пород
 - Единицу измерения мобильности (время движения)

Example 1: Monument Butte Field

Пример 1: Месторождение Monument Butte

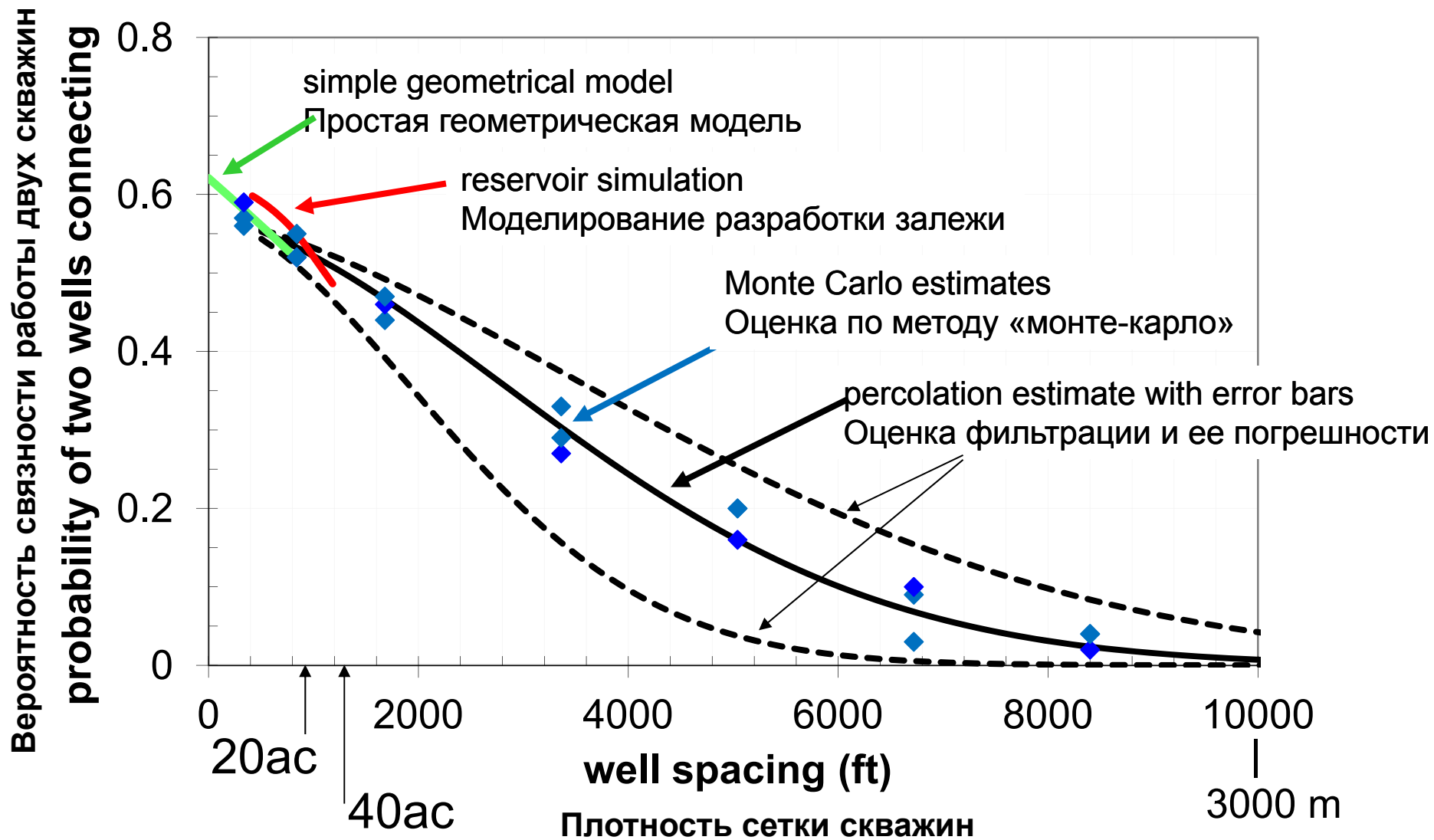
- Fluvio-lacustrine
- Approximately 17 thin zones
- Many areas already drilled to 40ac (16hec) spacing
- Apply percolation to NW target area
 - Approximately 35 wells
 - 6 sq mi (1600 hec)
- Tasks for target area
 - Define zone-by-zone probability of connection vs well spacing
 - Estimate uncertainties
- Озерно-аллювиальные фации осадконакопления
- До 17 маломощных интервалов
- Многие участки уже разбурены (плотность сетки - 1 скв. на 16 га)
- Применение теории фильтрации на северо-западном целевом участке
 - Ок. 35 скважин
 - 6 кв. миль (1600 га)
- Задачи исследования целевого участка:
 - Оценить вероятность поинтервальной связности пластов относительно плотности размещения скважин
 - Оценить неопределенности

Monument Butte connectivity evaluations

Оценка связности пластов месторождения Monument Butte

- Data needed for each zone
 - Sandbody “size”
 - Net-to-gross ratio
- Evaluated connectivity using
 - Percolation model
 - Monte Carlo simulation
 - Simplified geometrical approach
 - Reservoir simulation
- По каждой зоне необходимы следующие данные:
 - «Размеры» песчаного пласта
 - Коэффициент песчанистости
- Оценка связности пластов с использованием:
 - Модели фильтрации
 - Моделирования по методу «монте-карло»
 - Упрощенной геометризации
 - Моделирования разработки залежи

Monument Butte Zone D1 connectivity: Percolation agrees with 3 other methods
М-ние Monument Butte, связность зоны D1: Оценка фильтрации согласуется с результатами трех других методов



Percolation summary

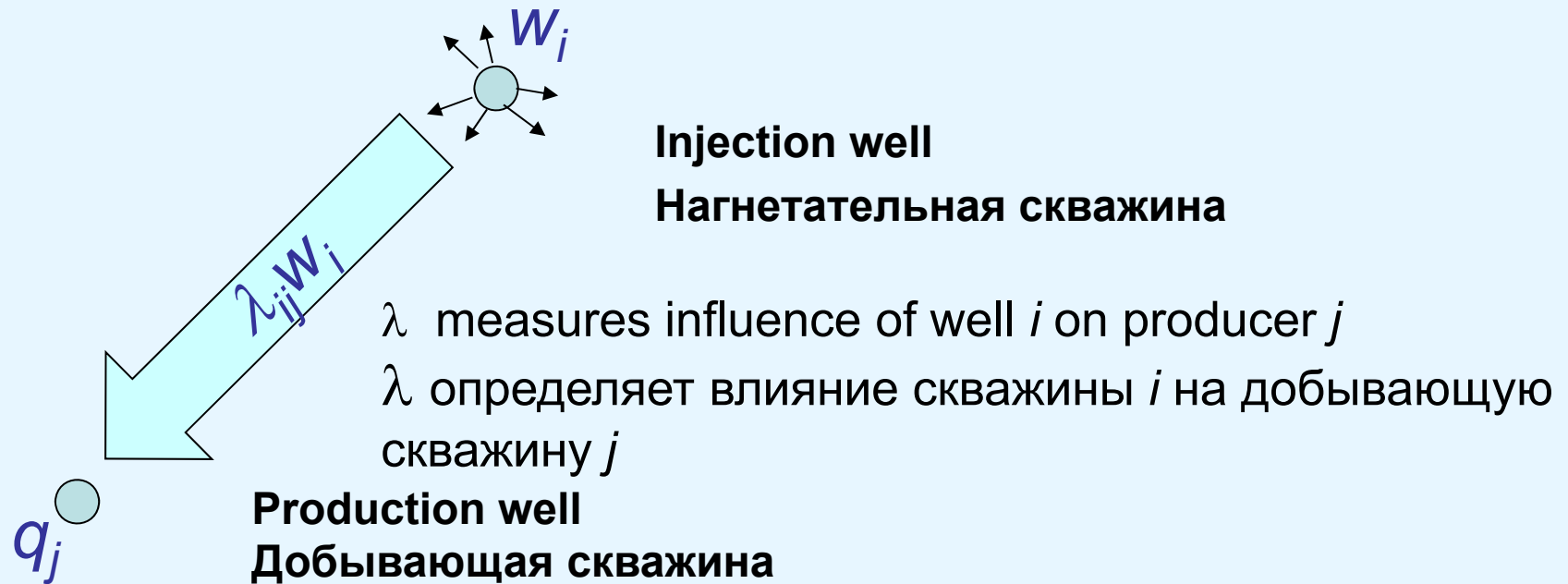
Итоговая оценка фильтрации

- Static method
- Allows for random aspects of connection
- Quick to compute
- Useful for scoping studies
- Needs
 - “Simple” geology
 - Sand geometries
 - Sand proportions
- No simulation needed
- Статический метод
- Позволяет оценить случайные аспекты, влияющие на связность
- Быстрый расчет
- Полезен для предварительной оценки
- Нужны
 - “Простая” геология
 - Оценка геометрии песчаного пласта
 - Оценка песчанистости (эффективной мощности)
 - Моделирования не требуется

Dynamic connectivity: Well-by-well material balance

Динамическая связность:

Оценка материального баланса по скважинам



$$c_t V_p \frac{d\bar{p}}{dt} = \sum \lambda_{ij} w_i - q_j$$

change in stored fluid = fluid in - fluid out

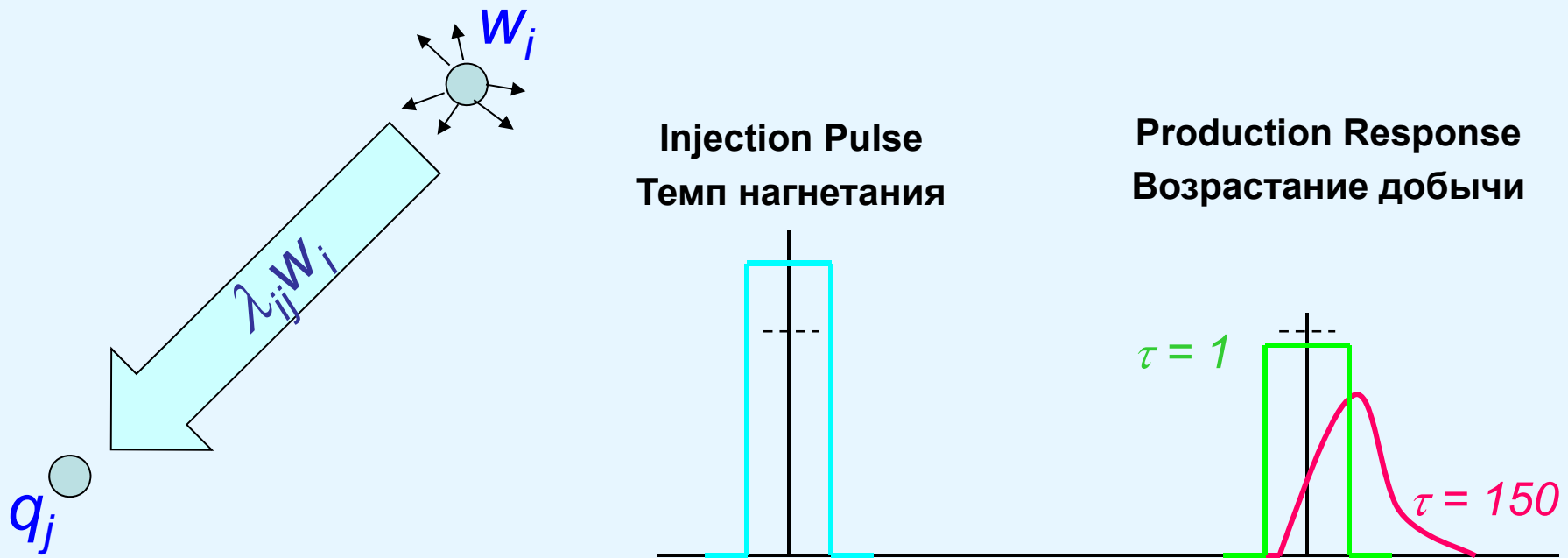
Изменение объема аккумулированного флюида = объемы закачки – объемы отбора

Dealing with response delays, τ

Оценка времени задержки τ

- convert \bar{p} to flow rate q and BHP p_{wf}
- преобразование \bar{p} в дебиты q и забойное давление p_{wf}

$$\tau \left(\frac{dq_j}{dt} + J_j \frac{dp_{wfj}}{dt} \right) = \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} w_i - q_j; \quad \tau = \left(\frac{c_t V_p}{J_j} \right)$$



The 'capacitance model'

Ёмкостная модель

$$\hat{q}_j(t) = \sum \lambda_{ij} \left[\frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int w_i e^{-t'/\tau} dt' \right] + q_0 + f(p_{wf})$$

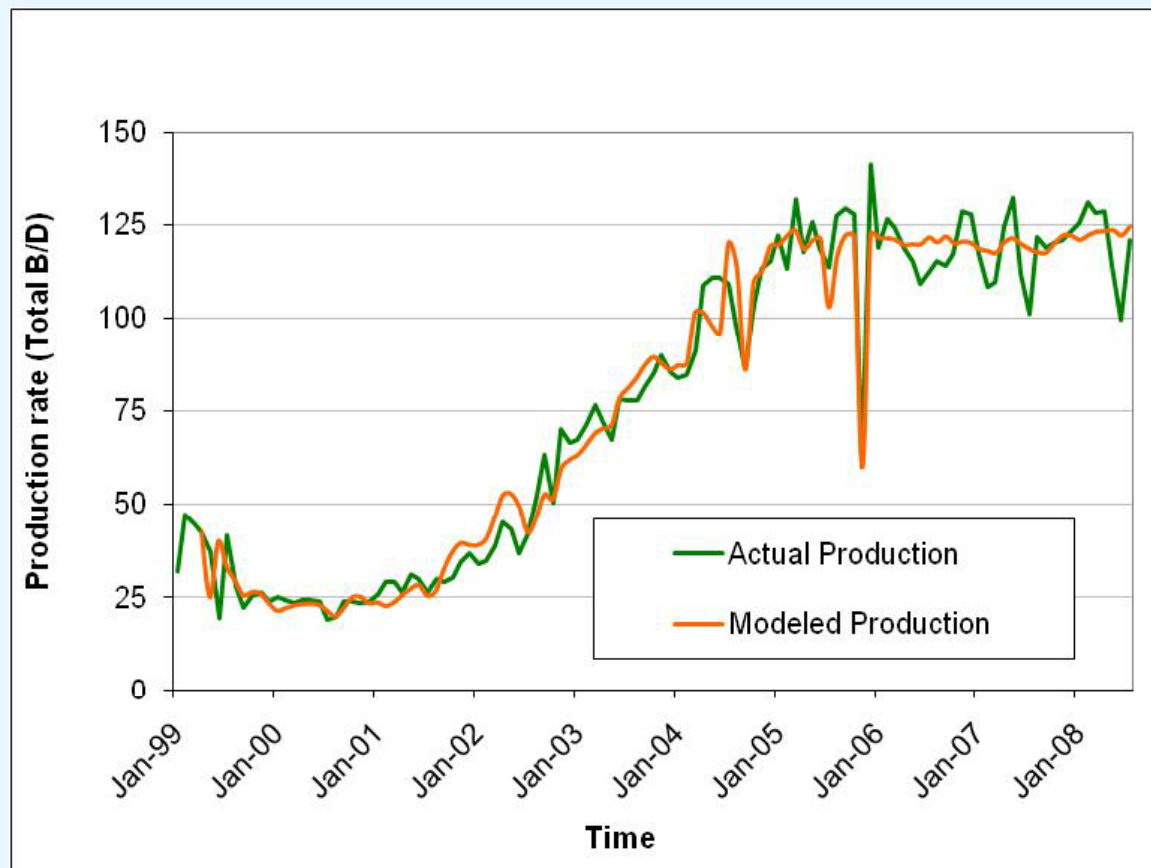
$\left. \begin{array}{l} \text{прогноз} \\ \text{добычи} \end{array} \right\} =$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{влияние} \\ \text{заводнения} \end{array} \right.$	$+ \begin{array}{l} \text{уровень} \\ \text{добычи} \end{array}$	$+ \begin{array}{l} \text{прежний} \\ \text{давления} \end{array}$	$\left. \begin{array}{l} \text{влияние} \\ \text{забойного} \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} \text{predicted} \\ \text{production} \end{array} \right\} =$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{waterflood} \\ \text{effect} \end{array} \right.$	$+ \begin{array}{l} \text{prior} \\ \text{production} \end{array}$	$+ \begin{array}{l} \text{bhp} \\ \text{effect} \end{array}$

- Problem is similar to electrical network problem
- Uses existing waterflood responses
- Need to estimate 2 parameters, λ and τ
- Эта проблема аналогична проблемам, возникающим в электрических сетях
- Использует данные задержки времени начала вытеснения при заводнении
- Требуется оценка двух параметров, λ и τ

Calculating the λ 's and τ 's

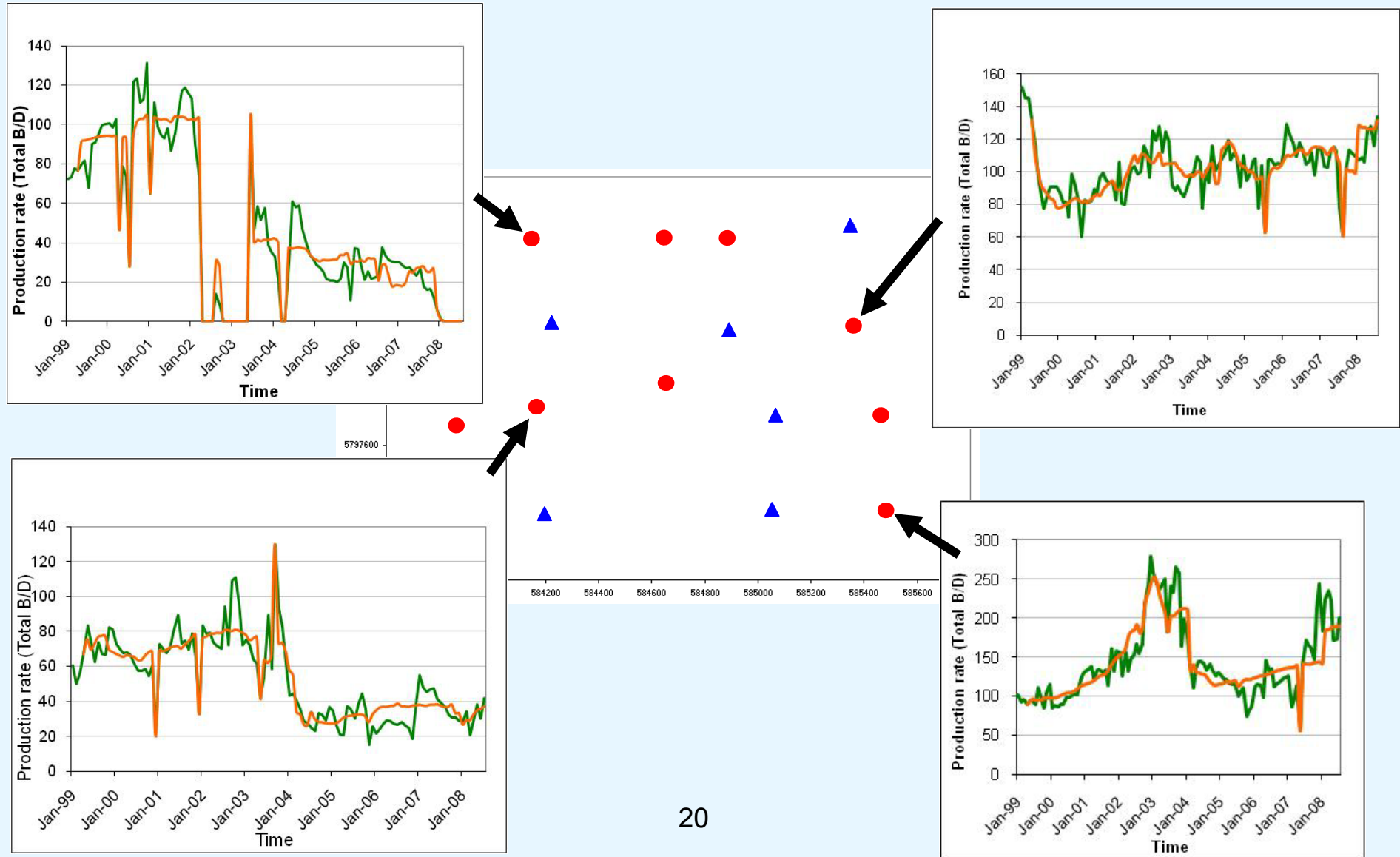
Расчет параметров λ и τ

- Use injection and production data
- Find λ 's and τ 's which give best production match
- Используйте данные нагнетания и добычи
- Найдите значения λ и τ , которые дают наилучшую согласованность с данными истории добычи



Best fit λ 's and τ 's across all well pairs history matching production

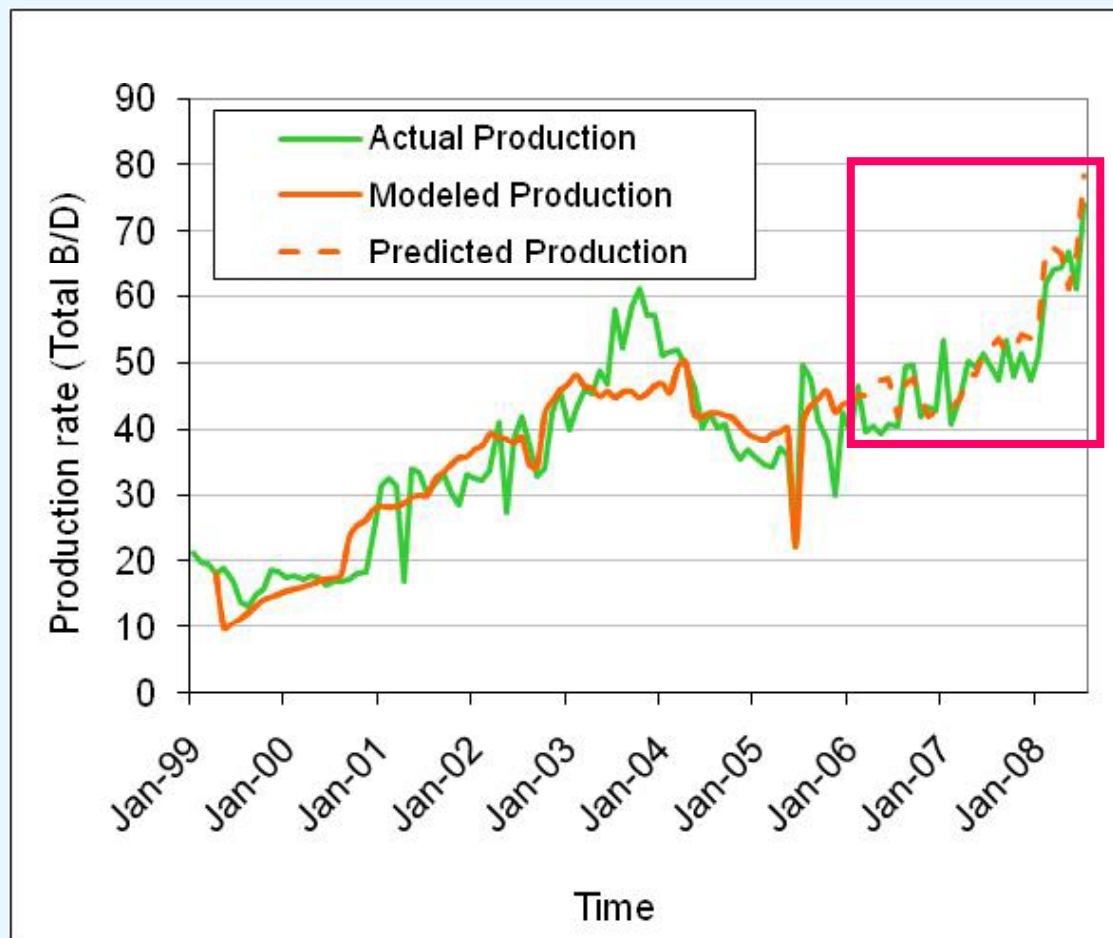
Максимальное совпадение значений λ и τ по всем парам скважин обеспечит согласованность модели с данным истории добычи



Testing the λ 's and τ 's

Проверка значений λ и τ

- Compare with production excluded from history match
- Сравните с данными добычи без согласования с историей добычи



Testing the λ 's and τ 's

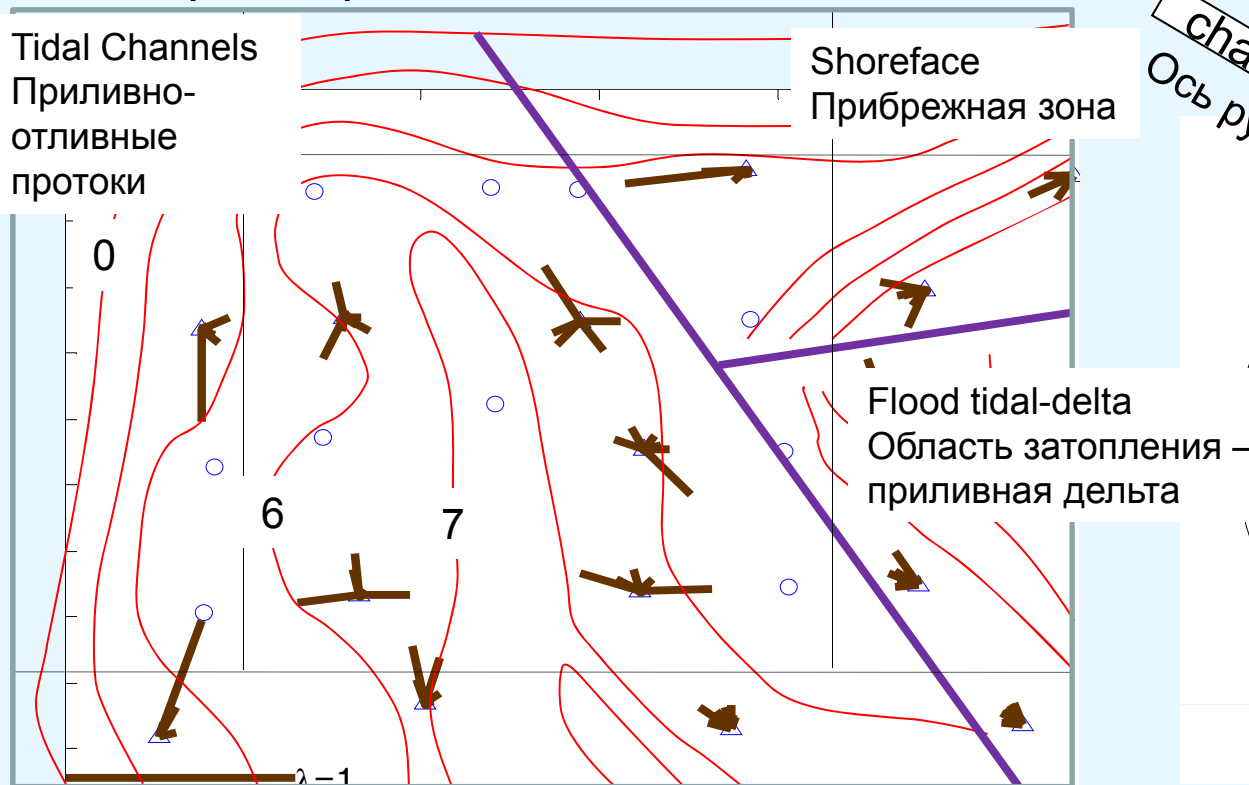
Проверка значений λ и τ

- Create vector maps using λ 's and/or τ 's
- Compare with other data (e.g., channel orientations)

- Используя значения λ и/или τ , постройте векторные карты
- Проведите сравнение с другими данными (например, с ориентацией речных русел)

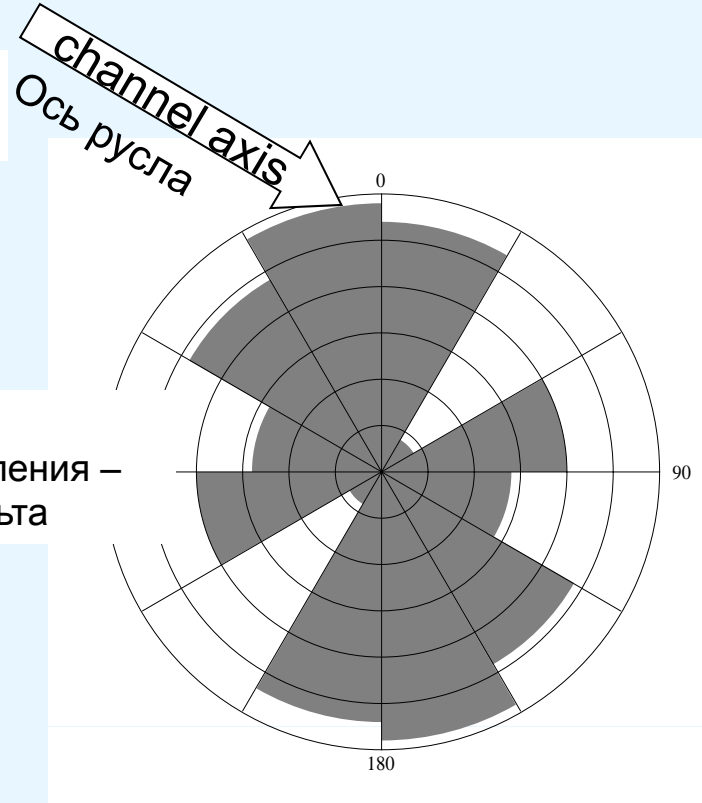
Gross-sand thickness and λ 's

Общая мощность пласта и значения λ



λ values and directions

Значения λ и направления

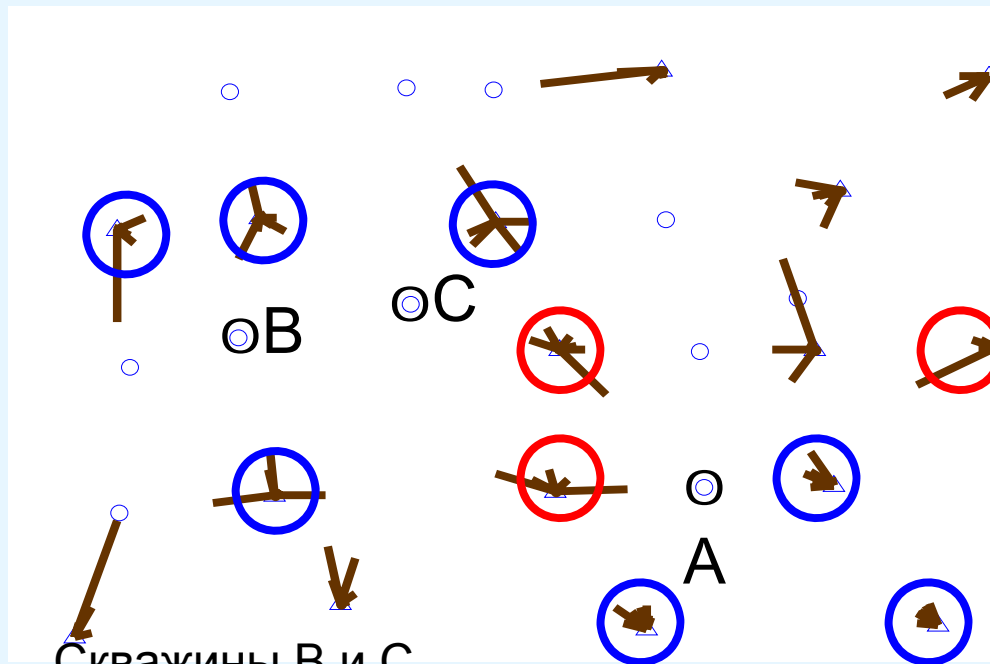


По Zaitlin and Shultz, 1990

Example 2: How do we use the results?

Пример 2: Как используются результаты оценки?

- Well A Скважина A
 - 3 injectors with good connectivity
 - 3 нагнетательные скважины с хорошей связностью
 - 3 injectors with poor connectivity
 - 3 нагнетательные скважины с плохой связностью



- Wells B & C Скважины B и C
 - Little connection with existing injectors
 - Плохая связь с существующими нагнетательными скважинами
 - Needs injection wells along channel axis
 - Необходимы нагнетательные скважины вдоль оси русловых каналов

Example 3: North Buck Draw

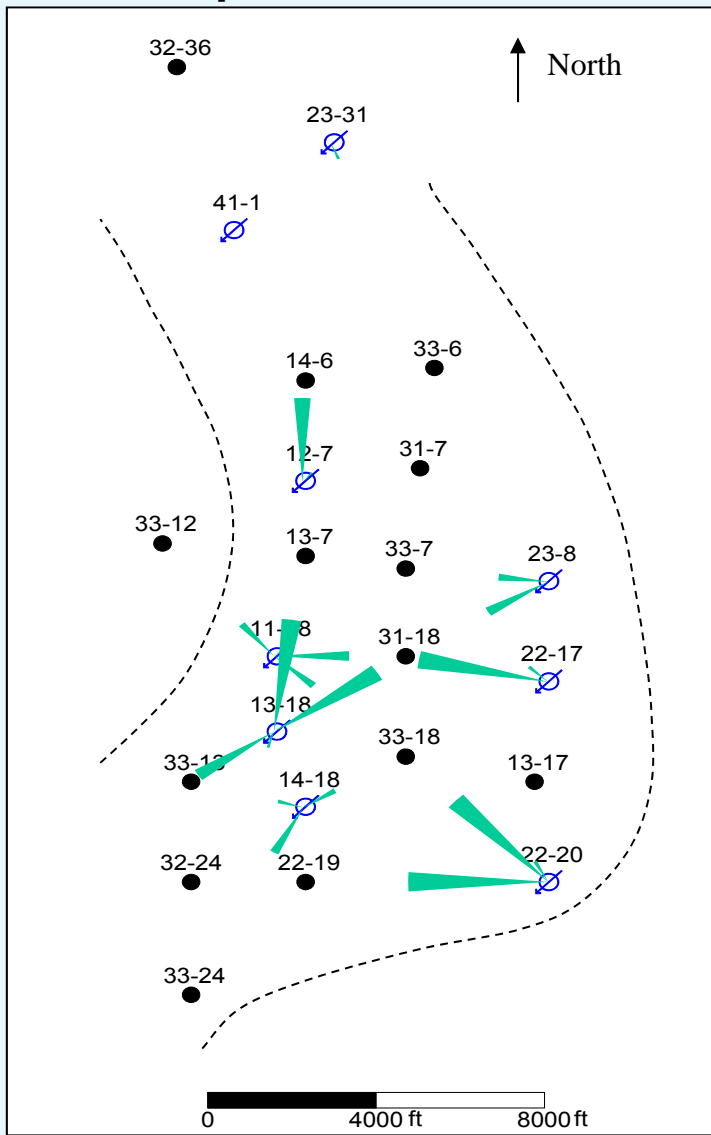
Пример 3: Месторождение North Buck Draw

- Gas injection
- Two proposed geological models
 - Sellars and Hawkins (1992)
 - Stacked point bars, channels
 - Good continuity
 - Gardner et al. (1994)
 - Fluvio-estuarine deposit
 - Fluvial good quality
 - Estuarine incises and reduces communication
- Нагнетание газа
- Предложены 2 геологические модели
 - Sellars and Hawkins (1992)
 - Многопластовые песчаники отмелей и русловых отложений
 - Хорошая выдержанность
 - Gardner et al. (1994)
 - Речные-эстуариевые отложения
 - Речные отложения с хорошими коллекторскими свойствами
 - Вложенные эстуариевые отложения снижают вероятность межпластовых перетоков

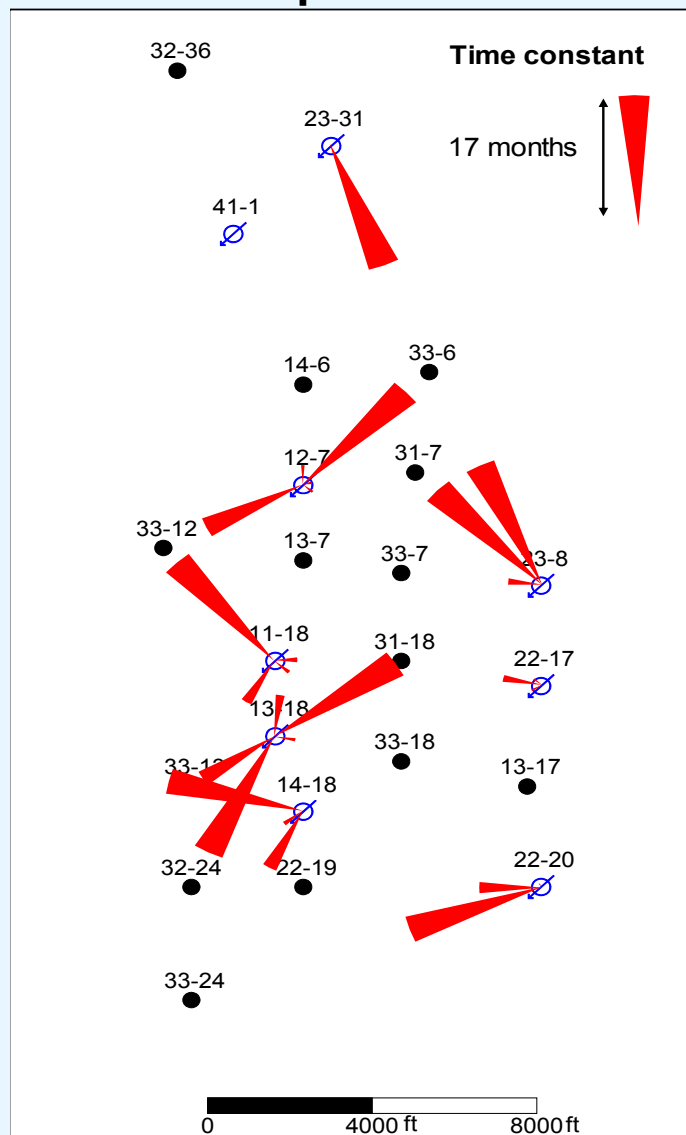
Buck Draw maps reflect geology

Карты месторождения Buck Draw отражают геологическое строение

λ map
Карта значений λ



τ map
Карта значений τ

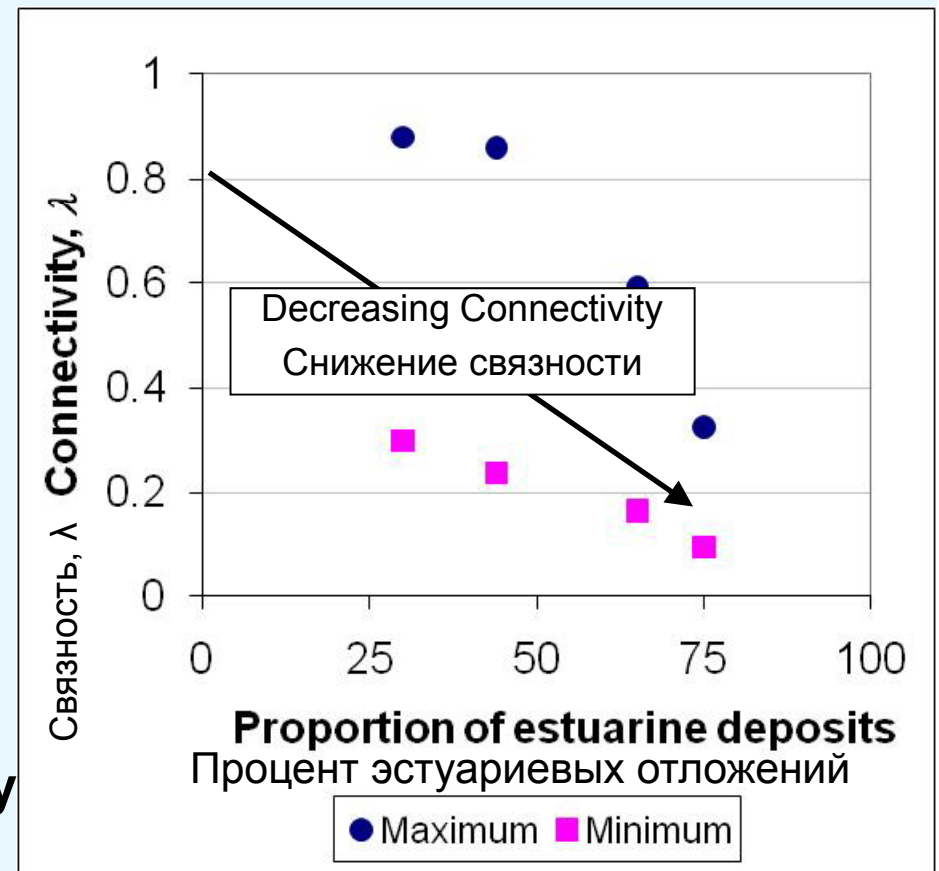


Buck Draw estuarine deposits and λ

Эстуариевые отложения и λ месторождения Buck Draw

- Relation between estimated deposits and λ
- Corresponds with geology and petrophysics
 - Fluvial good quality
 - Estuarine deposits poor
- Based on limited data

- **Взаимосвязь исследуемых отложений и λ**
- **Соответствие геологии и петрофизическим свойствам**
 - Высокое качество речных отложений
 - Низкие коллекторские свойства эстуариевых отложений
- **Оценка по ограниченному объему данных**



Capacitance model summary

Емкостная модель: Выводы

- Two CM field applications
 - Matched production
 - Results compared well with geological maps
 - Identified wells with little support
 - Gave basis for choosing a geological model
- Advantages
 - No reservoir simulation needed
 - Can accommodate shut-ins, workovers, conversions
 - Can use λ 's alone or use with τ 's for connectivity
- Limitations
 - Assumes constant reservoir parameters & mobility
 - High compressibility, low perm problematic
- Емкостная модель строилась для двух месторождений
 - Хорошая согласованность с данными добычи
 - Результаты хорошо согласуются с геологическими картами
 - Выявлены скважины с неэффективным нагнетанием
 - Создана основа выбора геологической модели
- Преимущества
 - Не требует моделирования разработки пласта
 - Позволяет учитывать периоды простоя, КРС, перевод скважин под нагнетание или добычу
 - Для оценки связности позволяет использовать или только значения λ , или значения λ и τ
- Ограничения
 - Параметры пласта и подвижность флюида принимаются постоянными
 - Плохо работает при высокой сжимаемости флюида и низкой проницаемости пласта

Percolation (PC) vs Capacitance Model (CM)

Выбор модели фильтрации (PC) или емкостной модели (CM)

- Connectivity defined differently by each method
 - PC: probability of *any* connected path
 - CM: influence of injector upon production rate
- Эти методы по-разному определяют связность
 - PC: по вероятности *любых* соединенных путей миграции флюида
 - CM: по влиянию нагнетательной скважины на дебиты добычи

SITUATION Варианты	LIMITED or NO Информация ограничена или отсутствует	AMPLE or YES Большой или достаточный объем информации
“Simple” geology «Простая геология»	CM	PC or/или CM
“Simple” flow «Простой характер фильтрации флюида»	CM	PC or/или CM
Core & log data Данные керна и ГИС	CM	PC or/или CM
Inj & prod data Данные нагнетания и добычи	PC	CM

Conclusions

- Connectivity
 - recognized as important for > 70 years
 - numerous ways to measure
 - many applications
- Static method (Percolation)
 - Statistical method; does not require flow data
 - Good scoping tool
- Dynamic method (Capacitance model)
 - Requires flow data
 - Robust: based on material balance
 - Results help integrate geology and flow information

Выводы

- Связность
 - Признается одним из важных параметров более 70 лет
 - Множество способов измерения
 - Различные области применения
- Статический метод (фильтрация)
 - Статистический метод; не требует динамических данных
 - Удобный метод предварительной оценки
- Динамический метод (емкостная модель)
 - Требуется данные фильтрации флюидов
 - Надежный метод: основан на материальном балансе
 - Результаты позволяют комплексно использовать данные геологии и информацию о фильтрации флюидов