

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЕГАЗОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт геологии и нефтегазодобычи

Кафедра геологии месторождений
нефти и газа

МЕТОДЫ ТРЁХМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методические указания
по проведению самостоятельной работы по дисциплине
«Геологическое 3D моделирование»
для аспирантов направления 05.06.015 «Науки о земле»,
направленности «Геология, поиски и разведка нефтяных
и газовых месторождений», «Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых»

Составители:
В. А. БЕЛКИНА,
кандидат физико-математических наук, доцент
А. А. ЗАБОЕВА,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент
Н. В. САНЬКОВА,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Тюмень
ТюмГНГУ
2015

Методы трёхмерного цифрового геологического моделирования: методические указания по проведению самостоятельной работы /сост. В. А. Белкина, А. А. Забоева, Н. В. Санькова; Тюменский государственный нефтегазовый университет. - Тюмень: Издательский центр БИК ТюмГНГУ, 2015. – 41 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры геологии месторождений нефти и газа 28 августа 2015 г., протокол №1

Аннотация

Методические указания по дисциплине «Геологическое 3D моделирование» предназначены для аспирантов, обучающихся по направлению 05.06.01 «Науки о земле», направленности «Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений», «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Данная дисциплина изучается в одном семестре.

Приведено обоснование методов построения цифровых геологических моделей месторождений нефти и газа и основные направления повышения их точности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ	4
Тема 1. Виды и типы информации используемой для построения 3D ГМ. Соответствие перечня исходных данных целям и задачам трехмерного геологического моделирования	4
Тема 2. Построение карт, описывающих структурно – стратиграфический каркас конкретной залежи. Обоснование вида и создание трёхмерной цифровой сетки.....	10
Тема 3. Изучение методов аппроксимации, используемых при создании цифровых моделей залежей. Оценка их точности и область использования ..	19
Тема 4. Создание концептуальной седиментационной модели. Особенности ее учета при построении 3D модели.	23
Тема 5. Создание концептуальной тектонической модели. Особенности ее учета при построении 3D модели.	30
Тема 6. Анализ анизотропии распределения литофаций в изучаемой залежи Обоснование числа и видов трендов, алгоритма моделирования литофациальной модели (ЛФМ), исходя из целей и задач трехмерного геологического моделирования. Анализ качества ЛФМ.	35
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	40

ВВЕДЕНИЕ

«Если Вы не можете моделировать Ваш процесс – Вы его не понимаете, если Вы его не понимаете – Вы его не можете улучшить, если Вы его не можете улучшить – Вы не будете конкурентоспособны в 21 веке».

Jim Trainham

Моделирование – это мощный метод управления разработкой месторождения, который позволяет изучить геологическую неоднородность пласта и предсказать его поведение в процессе разработки. За последнее десятилетие трехмерное моделирование стало неотъемлемой частью производственного процесса в нефтегазовых компаниях, в связи, с чем растет спрос на специалистов, обладающих навыками трехмерного геологического моделирования.

Цель курса *Геологическое 3D моделирование* – дать системное представление о трехмерном геологическом моделировании, как о завершающей интегрирующей стадии геологического изучения продуктивного пласта, понимание того, что полученная в итоге трехмерная геологическая модель является основой для эффективной разработки месторождения.

Практическая часть курса, представленная в данном методическом указании, направлена на изучения современного программного комплекса IRAP RMS, который в настоящее время наиболее широко распространен в российских нефтегазовых компаниях.

СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Тема 1. Виды и типы информации используемой для построения 3D ГМ. Соответствие перечня исходных данных целям и задачам трехмерного геологического моделирования.

Целью самостоятельной работы является знакомство с видами информации исходной информации. Необходимо научиться соотносить цели и задачи геологического моделирования с минимально необходимым перечнем исходных данных для создания 3D ГМ. Необходимо овладеть навыками подготовки, анализа и загрузки исходных данных для создания трехмерной геологической модели.

Сбор, анализ и подготовка исходных данных является первым и одним из наиболее важных этапов создания геологической модели. От достоверности и качества используемой информации напрямую зависит конечный результат моделирования. Согласно данным производственных отчетов, геологи и инженеры-разработчики тратят от 50 до 80 % времени, выделенного на создание геоло-

гической модели, на поиск, анализ и подготовку исходных данных и только от 15 до 30 % на их интерпретацию.

Количество и объем исходных данных в значительной степени определяют методики и алгоритмы создания ГМ. Все данные, используемые при создании любой ГМ, можно разделить на три основные группы – прямые, косвенные и априорные. Прямые данные получают при непосредственном исследовании объекта моделирования, они дают наиболее точную и достоверную информацию о нем. В геологии прямые данные получают только по замерам в скважинах.

Ввиду сложности изучаемых в геологии объектов, существует ряд целевых параметров, прямое измерение которых невозможно по объективным причинам. В этом случае производят замеры других доступных физических параметров, имеющих статистическую зависимость с целевым геологическим параметром, которые называют косвенной информацией. В случае, если прогноз целевого параметра возможен по различным геолого-геофизическим параметрам, выбирают характеристику или группу характеристик с наилучшими прогностическими свойствами, т. е. имеющими наиболее тесную статистическую зависимость с целевым параметром. Очевидно, что получаемые при этом уравнения регрессии оказываются разными для разных геологических объектов, более того, они могут быть разными даже для разных частей залежи.

Априорная информация – информация, которая получена и известна до начала исследования объекта моделирования. К априорной информации относятся:

- информация о виде закона распределения вероятности параметра и мере его рассеяния, которая извлекается из опыта предшествующих измерений;
- информация о том, насколько значение измеряемой величины может отличаться от результата однократного измерения, которая может быть представлена классом точности прибора;
- информация о значении аддитивной и/или мультипликативной поправки. Если значение поправки неизвестно, то оно учитывается ситуационной моделью, согласно которой значение поправки может быть любым с одинаковой вероятностью в пределах от и до.

В качестве примера рассмотрим априорную информацию, широко используемую при построении карт эффективных нефтенасыщенных толщин $h_{эф.н}$. Из геологических свойств этой карты следует, что её значения равны нулю на внешнем контуре нефтеносности. Поэтому при построении двухмерной цифровой модели $h_{эф.н}$ кроме прямых замеров следует использовать ряд точек внешнего контура, в которых значение $h_{эф.н}$ равно 0.

Перед построением модели должно быть проверено качество исходных данных и их непротиворечивость друг другу.

Если рассмотреть поэтапно весь процесс создания 3D ГМ, то можно для каждого этапа выделить основную (или прямую) информацию и косвенную

и/или априорную информацию, которая имеет подчиненное значение (табл. 1.1).

Анализируя приведенную таблицу, можно сделать вывод о том, что в зависимости от этапа работы те или иные данные могут переходить из разряда прямых в косвенные и наоборот. Кроме того, отметим, что результаты каждого предыдущего этапа построения ГМ могут являться косвенной информацией для следующего этапа.

Таблица 1.1

Основные этапы построения трехмерной геологической модели,
виды прямой, косвенной и априорной информации

№	Этап создания геологической модели	Основные (прямые) данные	Косвенные и априорные данные
1	Концептуальная модель - тектоническая	скважинные отбивки	2D и 3D сейсморазведка современные аналоги результаты физического моделирования ГДИС
	- седиментационная	керна обнажения горных пород	каротажные диаграммы ГИС 3D сейсморазведка современные аналоги результаты физического моделирования
2	Структурная модель	скважинные отбивки	2D и 3D сейсморазведка концептуальная тектоническая модель
3	Литолого-фациальная модель	керна	каротажные диаграммы ГИС 3D сейсморазведка концептуальная седиментационная модель шлифы
4	Модель ФЕС	керна	концептуальная тектоническая модель каротажные диаграммы ГИС 3D сейсморазведка ГДИС концептуальная седиментационная модель литолого-фациальная модель
5	Модель насыщения	результаты испытания и опробования скважин	каротажные диаграммы ГИС

При достаточном количестве прямых данных адекватную ГМ можно создать без привлечения косвенной и априорной информации. Однако на практике, как правило, прямых исходных данных не хватает, в этом случае необходимо привлекать всю имеющуюся информацию. Очевидно, что чем больше априорной и/или косвенной информации используется при построении ГМ, тем выше её точность. Другими словами, наибольший эффект достигается при комплексировании на начальном этапе моделирования разномасштабных данных в едином масштабе измерений – масштабе ГМ.

Обязательный минимальный перечень исходной информации для создания 3D ГМ включает в себя:

1. координаты устьев скважин, альтитуды, данные инклинометрии, они используются для создания траектории скважин в модели;
2. координаты пластопересечений, рассчитанные маркшейдерской службой, они служат для контроля координат пластопересечений, рассчитанных в программном продукте, при загрузке устьевых координат, альтитуды и инклинометрии. В случае отсутствия замеров инклинометрии, эти данные используются для пересчёта траекторий наклонных скважин в траектории вертикальных. А именно, координаты устьев принимают равными координатам пластопересечений, а альтитуды – сумме альтитуд и удлинений на кровлю моделируемого объекта;
3. стратиграфические скважинные отбивки, полученные по результатам детальной скважинной корреляции. Они являются основой для создания структурной модели;
4. диаграммы ГИС – в первую очередь используются для проведения детальной корреляции, привязки данных сейсморазведки, электрофациального анализа, атрибутивного анализа;
5. РИГИС – включают в себя результаты литологического расчленения, оценку характера насыщения, количественную оценку ФЕС и насыщенности интервалов коллекторов;
6. результаты интерпретации данных сейсморазведки лежат в основе создания моделей литологии, ФЕС, характера насыщения;
7. уравнения петрофизических зависимостей «керна-керна» и «керна-ГИС», граничные значения «коллектор-неколлектор» параметров $K_{по}$ и $K_{пр}$, кривые капиллярного давления – используются при построении моделей ФЕС и насыщения.

Кроме того, дополнительно могут быть привлечены следующие данные:

1. данные сейсморазведки – включают в себя как результаты качественной (структурные карты по основным отражающим горизонтам, поверхности тектонических нарушений), так и количественной (сейсмические атрибуты) интерпретации. Результаты интерпретации используются в качестве косвенной информации при создании структурной модели. Сейсмические атрибуты при тесной статисти-

ческой связи с моделируемым параметром используются для создания модели литологии и ФЕС. Если качество исходных сейсмических данных позволяет провести сейсмофациальный анализ, его результаты привлекаются для создания концептуальной седиментационной модели и литолого-фациальной модели;

2. данные бурения, испытания и промысловые данные позволяют определить скважины, в которых данные о насыщении искажены влиянием разработки, они используются при создании модели характера насыщения и насыщенности;
3. материалы ранее выполненных геологических отчетов, они включают в себя как текстовую часть, так и графические приложения (схемы корреляции, структурные карты стратиграфических границ и границ коллекторов, карты общих, эффективных и эффективных нефтенасыщенных толщин, карты ФЕС, поверхностей межфлюидных контактов, литологических границ, тектонических нарушений, категорий запасов и т.д.). Данная информация заносится в базу данных проекта и часто служит эталоном при контроле качества полученных результатов моделирования.

Для создания 2D ГМ одного геологического параметра достаточно координат пластопересечений (X , Y) и значений картируемого параметра в точках скважин (Z). В зависимости от вида модели параметр Z принимает различные значения. Так, при построении структурных карт Z – это а.о. стратиграфических границ моделируемого объекта, определенные по результатам детальной корреляции ГИС, при построении карт толщин Z – $h_{об}$, $h_{эф}$, $h_{эф.н}$, при построении карт параметров Z – средневзвешенные значения $K_{по}$, $K_{пр}$, $K_{нн}$ и т. д. При построении 2D цифровой сетки значение Z вычисляется в каждой точке сетки моделируемого объекта. При переходе к 3D модели значение Z должно быть присвоено каждой ячейке объема моделируемого объекта, что требует значительного увеличения объема исходных данных (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Минимально необходимый набор исходных данных
для создания геологической модели

2D модель	3D модель
X, Y – координаты пластопересечения	X, Y – устьевые координаты скважины
	альтитуда скважины
	инклинометрия
Z – единичное значение картируемого параметра в точках скважин:	значение моделируемого параметра вдоль траектории скважин:
а.о. стратиграфических границ и границ коллектора пласта	глубины залегания стратиграфических границ и границ коллектора пласта
- $h_{об}$, $h_{эф}$, $h_{эф.н}$	РИГИС (поточечная или поинтервальная интерпретация диаграмм ГИС вдоль траекторий скважин)
$K_{по}$, $K_{пр}$, $K_{нн}$ – средневзвешенные значения в скважинах по данным РИГИС	

Литература по теме:

- 1 Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 199 с.
- 2 Баранов В.Е., Куреленков С.Х., Шевелева Л.В. Прикладное моделирование пласта: Учебное пособие. – Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела, 2007. – 104 с.
- 3 Дюбрул О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных. EAGE, 2007. – 296 с.
- 4 Забоева А.А. Методика построения трехмерной геологической модели [Текст]: Методические указания для лабораторных работ / сост. А.А.Забоева, В.А.Белкина – Тюмень: ТюмГНГУ 2013. – 40 с.
- 5 Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009 – 376 с.
- 6 Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2008 – 272 с.
- 7 Косентино Л. Системные подходы к изучению пластов - М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2007. – 400 с.
- 8 Лусиа Ф.Дж. Построение геолого-гидродинамической модели карбонатного коллектора: интегрированный подход. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 384 с.

Тема 2. Построение карт, описывающих структурно – стратиграфический каркас конкретной залежи. Обоснование вида и создание трёхмерной цифровой сетки

Целью самостоятельной работы является углублённое изучение методов создания структурно-стратиграфического каркаса, обоснование наиболее подходящего алгоритма для конкретной залежи с учётом особенностей её строения и объёма и видов исходных данных (прямых, косвенных и априорных).

Двухмерное картопостроение является одним из основных средств получения и наглядного представления геологической информации. Карты позволяют изучать свойства продуктивных пластов и их изменчивость, оценивать потенциал месторождений.

Двухмерные геологические модели используются для решения практически всех геологических задач. Перечислим их.

- Оценка запасов углеводородов и представление материалов при создании отчёта по подсчёту запасов.
- Оценка запасов, построение карт эффективных нефте- и газонасыщенных толщин. Определение средних значений фильтрационно-ёмкостных свойств для проектов на поисковой и разведочной стадиях.
- Оценка запасов и построение карт эффективных нефте- и газонасыщенных толщин, определение средних значений ФЕС при аудите запасов.
- Картопостроение на различных этапах создания 3D геологических моделей. В частности, построение 3D ГМ начинается с создания структурного каркаса.
- Контроль качества 3D геологических моделей в процессе их построения.

В зависимости от сложности геологического строения залежи и видов геологических исследований при построении моделей используются разные наборы исходных данных. Перечислим в общем виде основные виды исходных данных:

- координаты пластопересечений (X, Y);
- значения картируемого параметра (Z) в точках (X, Y);
- косвенная информация;
- априорная информация;
- отбивки флюидных контактов;
- полигоны лицензии, внутренний и внешний контуры нефте(газо)носности, границы зон замещения, выклинивания, тектонических нарушений, категорий запасов и т. д.

Обязательными при построении двухмерной модели являются координаты пластопересечений (X , Y) и значения картируемого параметра (Z).

Геометрию залежи или структурно-стратиграфический каркас описывают:

- структурные карты стратиграфических границ кровли и подошвы пласта;
- структурные карты кровли и подошвы коллектора пласта;
- карты общих толщин пласта ($h_{об}$) и всех прослеженных пропластков;
- карты поверхностей контактов (нефть-вода, нефть-газ, газ-вода);
- карты поверхностей замещений;
- карты тектонических разломов;
- контуры продуктивности (внешний, внутренний контуры нефтеносности, внешний, внутренний контуры газоносности).

Пример. На подавляющем большинстве месторождений Западной Сибири имеются структурные карты по отражающим сейсмическим горизонтам. В случае унаследованной модели осадконакопления структурные карты по опорным сейсмическим горизонтам используются в качестве косвенной информации при построении стратиграфических поверхностей. По сути, сейсмические карты являются главным источником прогноза изменения стратиграфических границ в межскважинном пространстве.

Сделаем ещё одно существенное замечание. Модель – это всегда приближённое описание изучаемого объекта, причём её точность в большой степени определяется объёмом, используемой для её построения информации: прямой, косвенной и априорной. Кроме ошибок измерений модели могут быть осложнены грубыми погрешностями, возникающими в результате просчётов, ошибок корреляции и т.д. Больше всего такого рода погрешностей на ранних стадиях разведки, когда плотность сети наблюдений заметно меньше размеров изучаемых объектов. Грубые ошибки значимо отличаются от других, они могут быть выявлены при появлении дополнительной исходной информации, а иногда тщательным анализом модели. Технология построения модели требует такого анализа по всем параметрам модели на каждом этапе.

Укажем ещё на одно существенное свойство геологических моделей. Построение ГМ всегда выполняется при недостатке данных. Изучение геологического строения любого месторождения представляет собой итерационный процесс, в котором строение месторождения на каждом шаге уточняется по мере появления новых данных. Как показано в работе [5], представления, в частности, о геометрии залежи с использованием новых данных могут меняться существенно. Если на начальном этапе ГРП залежь представляется как единое связанное тело, то при дальнейших исследованиях оказывается, что имеет место совокупность ряда отдельных залежей. Окончательно, строение залежей уточняется на этапе разработки.

Структурно-стратиграфическое моделирование означает создание приближенного описания границ последовательности пластов в соответствии с глубинами их залегания [1]. Каждая граница представляет собой поверхность и называется горизонтом (термин, принятый при построении трёхмерных геологических моделей). Горизонт описывает поверхность, ограничивающую в пространстве моделируемый объект, например, кровли или подошвы пласта, пропластка, объекта разработки, стратиграфического интервала. Он может содержать как собственно структурные поверхности (двухмерные сетки/гриды) в глубинном или временном масштабе, так и любые данные, связанные с поверхностями: контуры, сейсмические профили и поверхности контактов. Все объекты, принадлежащие типу «горизонт», имеют вертикальную отметку в абсолютных значениях, отсчитываемую от уровня моря.

Таким образом, горизонт представляет собой непрерывную поверхность, отвечающую какой-либо границе пласта (кровле или подошве).

Как правило, пласты на месторождениях Западной Сибири залегают согласно, и стратиграфическая модель представляет собой «слоёный пирог», состоящий из конформно залегающих поверхностей, одна под другой. Поверхности не могут пересекаться. В случае выклинивания пласта поверхности (горизонты) кровли и подошвы этого пласта совпадают по глубине. В остальных случаях расстояние между поверхностями соответствует толщине пласта или расстоянию между соседними пластами.

Задача структурного моделирования состоит в том, чтобы создать непротиворечивую, непересекающуюся последовательность границ пластов, которая адекватна моделируемому геологическому объекту. Структурные построения основываются на абсолютных отметках пластовпересечений, значений общих толщин, трендах (косвенная информация) и поверхностях разломов.

Построение структурной модели следует начинать с наиболее изученного пласта. Как правило, таковым является верхний пласт, который разбурен большим числом скважин. Построение первой границы стратиграфической последовательности является важнейшим этапом построения двухмерной модели. Далее построенная граница используется для создания последующих границ стратиграфической последовательности. Другими словами, ошибки, осложняющие первую карту, могут значимо увеличить погрешность дальнейших построений. Первая базовая граница может использоваться либо в качестве тренда (методика 1), либо как слагаемое с картой общих толщин (методика 2 – методика схождения).

Выбор способа построения поверхностей зависит от конкретных особенностей методик и алгоритмов, реализованных в программе, а также от особенностей геологического строения изучаемого объекта.

Подробно рассмотрим наиболее часто используемую последовательность алгоритма построения структурных карт кровли $h^{\text{кров}}$ и подошвы $h^{\text{под}}$ пласта при наличии косвенной информации, а именно глубинной сейсмической карты,

причём отражающий горизонт расположен выше стратиграфической поверхности кровли (методика 2):

- находятся значения разности между абсолютными отметками кровли коллектора пласта в скважинах и сейсмической картой, другими словами, отклонения кровли коллектора от кровли отражающего горизонта;
- строится карта отклонений кровли коллектора от кровли отражающего горизонта ($h_o^{\text{сейс}}$);
- структурная карта кровли пласта находится сложением сейсмической карты и карты $h_o^{\text{сейс}}$;
- в соответствии со сделанным выше замечанием, на следующем шаге необходимо сделать проверку точности карты $h^{\text{кров}}$. Для этого следует найти невязки между картой $h^{\text{кров}}$ и абсолютными отметками стратиграфической кровли пласта, оценки математического ожидания и дисперсии невязок, построить гистограмму частот, построить карту невязок. Согласно рекомендациям по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей величина невязок при структурном построении не должна превышать $\pm 0,5$ м. [5, 6, 7]. По карте невязок можно выявить участки с наиболее высокой и наиболее низкой точностью модели. Ясно, что участки с пониженной точностью должны располагаться в зонах с менее плотной сетью наблюдений или с более сложным геологическим строением;
- вычисляются стратиграфические толщины пласта в скважинах по стратиграфическим отбивкам;
- строится карта общих толщин пласта $h_{\text{об}}$;
- вычисляется карта стратиграфической подошвы пласта сложением карт $h^{\text{кров}}$ и $h_{\text{об}}$;
- анализируется точность карты стратиграфической подошвы пласта.

Описанный метод построения 2D геологической модели получил название метода схождения. Он принципиально отличается от этого понятия в вычислительной математике, где и был введён впервые. Однако в силу широкого применения понятия «метода схождения» в геологическом моделировании в таком аспекте, далее он используется именно в таком понимании.

В представленном варианте метода схождения стратиграфические поверхности отстраиваются сверху вниз, но в ряде ситуаций более точную модель можно получить при использовании его «снизу-вверх». Эти ситуации могут быть обусловлены как особенностями геологического строения объекта, так и геометрическим положением косвенной информации. Если отражающий горизонт находится ниже стратиграфической карты подошвы, то используется метод схождения «снизу-вверх». Среди геологических факторов,

обуславливающих построение модели «снизу-вверх», назовём нарушенное залегание кровли пласта, например, размыв.

При построении границ коллектора пласта в качестве базовых поверхностей следует рассматривать соответствующие стратиграфические поверхности. Так структурную карту по кровле коллектора $h_{\text{кол}}^{\text{кров}}$, следует строить методом схождения «сверху-вниз» от структурной карты $h^{\text{кров}}$, а структурную карту подошвы коллектора $h_{\text{кол}}^{\text{под}}$ – «снизу-вверх» от карты $h^{\text{под}}$. Однако, при определенных геологических условиях построение карт $h_{\text{кол}}^{\text{кров}}$ и $h_{\text{кол}}^{\text{под}}$ необходимо проводить последовательно друг за другом либо «сверху-вниз» (например, когда рассматриваемый пласт несогласно залегает на выступах фундамента), либо «снизу-вверх», когда стратиграфическая кровля пласта размыва.

Карты $h_{\text{кол}}^{\text{кров}}$ и $h_{\text{кол}}^{\text{под}}$ следует строить после нахождения карт соответствующих стратиграфических поверхностей. При построении этих карт должны выполняться условия:

$$h_{\text{кол}}^{\text{кров}} \geq h^{\text{кров}} \text{ и } h_{\text{кол}}^{\text{под}} \leq h^{\text{под}}. \quad (2.1)$$

Использование условий (2.1) позволяет повысить точность модели, применение условия (2.1) иногда ограничено возможностями программного обеспечения (ПО).

Замечание. Структурную карту подошвы можно построить и по а.о., но этот алгоритм менее предпочтителен, чем методика схождения. Оценки точности этих двух алгоритмов отсутствует, да и вряд ли возможны вообще. Имеются соображения о преимуществах методики схождения. Во-первых, она гарантирует отсутствие пересечения изогипс кровли и подошвы в случаях небольших значений толщин. Во-вторых, толщина пласта, как правило, характеризуется меньшей изменчивостью, а значит, её производные имеют меньшие значения. Согласно оценке точности интерполяции, при прочих равных условиях, погрешность интерполяции более гладких функций оценивается меньшей величиной. Отсюда следует, что точность интерполяции карты общих толщин выше точности интерполяции структурных карт.

Трехмерная сетка – это ячеистый каркас, внутри которого производятся вычисления всех основных этапов геологического моделирования. Главное отличие трехмерной сетки от двумерной сетки в том, что каждая ячейка трехмерной сетки занимает определенный объем в пространстве, тогда как ячейка двумерной сетки характеризуется только площадью. Правильно построенная трехмерная сетка – это основа построения корректной геологической модели.

Теперь рассмотрим вопросы обоснования и видов трёхмерных сеток.

Создание трехмерной сетки сводится к решению ряда задач:

- определение области моделирования;
- определение горизонтального строения сетки (тип и горизонтальное разрешение) – предопределяет количество строк и столбцов в сетке;

- определение вертикального строения сетки (характер и вертикальное разрешение) – предопределяет количество слоев в сетке.

Каждая ячейка в сетке имеет два вида координат: XYZ – соответствующие ее абсолютному положению в пространстве и ijk – соответствующие ее относительному положению в сетке (i – номер строки, j – номер столбца, k – номер слоя).

Трехмерная сетка строится внутри некоторой области. Она представляет собой объем между двумя или несколькими стратиграфическими поверхностями, расположенными одна под другой. Для отображения геологического строения и объемов моделируемых объектов, область делится на мелкие ячейки. Совокупность этих ячеек и есть трехмерная геологическая сетка.

Для создания области необходимо как минимум две стратиграфические поверхности, в этом случае область является единой. Но на практике область чаще всего создается из последовательности нескольких стратиграфических поверхностей. В этом случае она представляет собой последовательность нескольких подобластей.

Модель может содержать любое количество областей. Необходимость использования нескольких областей возникает в том случае, когда моделируемый интервал характеризуется существенной толщиной. В этом случае, при создании трехмерной сетки в единой области, модель может содержать десятки миллионов ячеек, что существенно снижает скорость всех дальнейших расчетов.

Выход из этой ситуации заключается в создании нескольких областей, каждая из которых включает в себя определенную часть моделируемого интервала. Как вариант, в качестве отдельных областей можно взять разные стратиграфические подразделения. Например, если пласт ЮВ₁¹ делится на две пачки – ЮВ₁^{1a} и ЮВ₁^{1б}, то каждая из пачек может быть выделена в отдельную область. При этом, если пачки не разделены между собой выдержанной глинистой перемычкой, прослеживаемой на всей площади участка моделирования, то выделяется две области, если же по результатам детальной корреляции такая перемычка выделяется – то три области (рис. 2.1). В этом случае модель строится раздельно для каждой области.

Трехмерные сетки бывают двух типов – структурированные и неструктурированные (рис. 2.2). Ячейки структурированных сеток всегда представляют собой шестигранники (то есть имеют 8 вершин). Ячейки неструктурированных сеток не имеют ограничений по форме ячейки. В настоящее время в большинстве программных пакетов трехмерного геологического моделирования реализована возможность создания структурированных сеток.

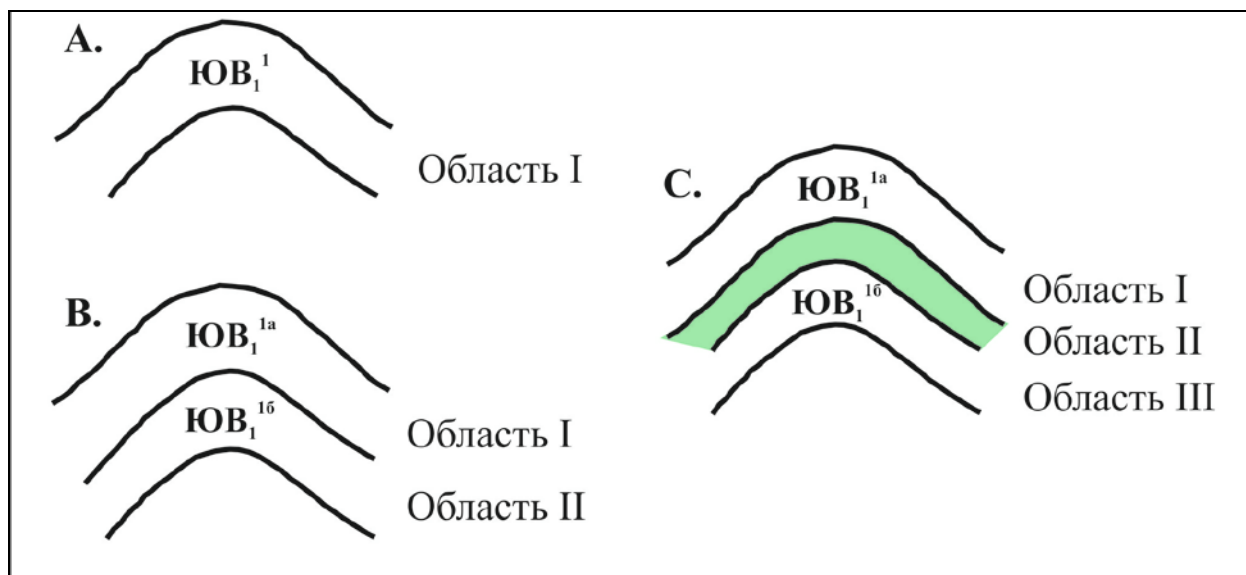


Рис. 2.1 – Пример выделения областей моделирования в трехмерной геологической сетке
(А – один пласт, Б – два пласта не разделенных глинистой перемычкой, В – два пласта, разделенные глинистой перемычкой)

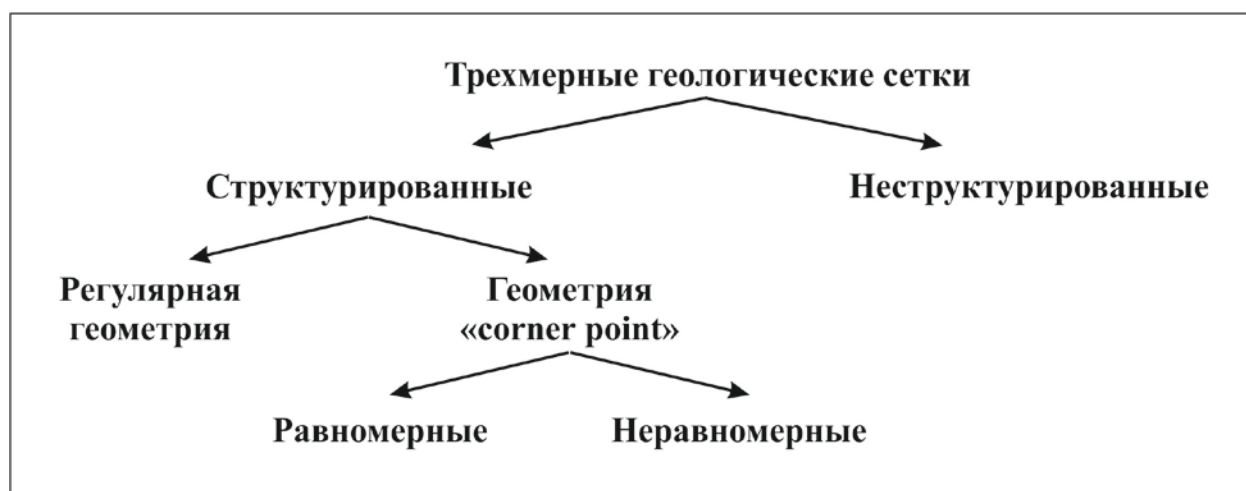


Рис. 2.2 – Классификация трехмерных геологических сеток

Структурированные трехмерные сетки в свою очередь могут быть представлены регулярной или нерегулярной (геометрия «угловой точки») геометрией ячеек:

- регулярная геометрия - предназначена для трехмерных сеток с равномерным горизонтальным разрешением, т.е. ячейки которых одинакового размера по горизонтали (рис. 2.3). При описании сетки регулярной геометрии используется только Z-координата вершин всех ячеек. Координаты X и Y в описании сетки напрямую не ис-

пользуются. При необходимости они легко рассчитываются, что значительно упрощает ее описание и увеличивает скорость всех расчетов. Основной особенностью данного типа сеток является то, что все ячейки должны иметь одинаковую длину и ширину, а их ребра строго вертикальны. Это обуславливает невозможность встраивать разломы в сетку;

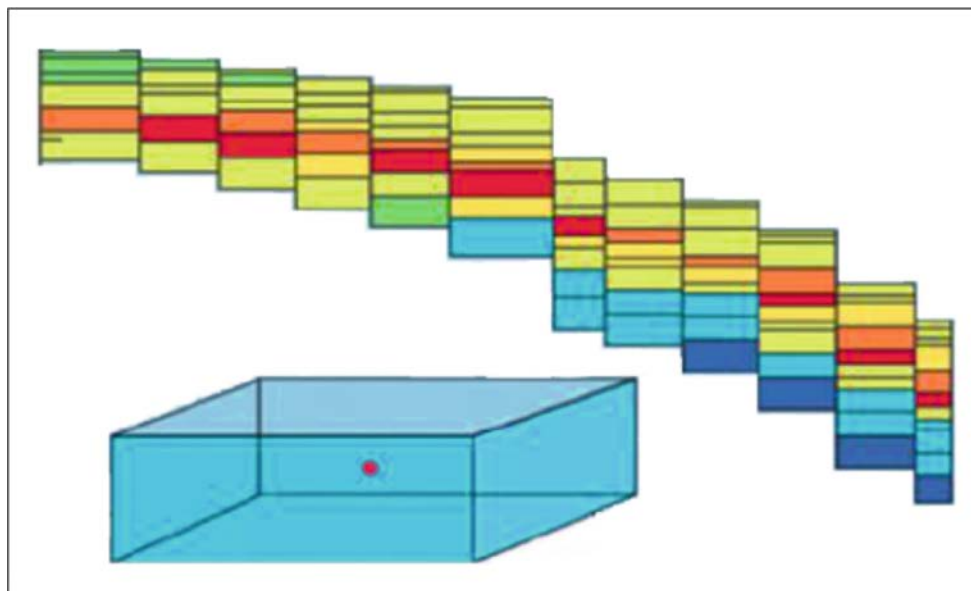


Рис. 2.3 – Регулярная геометрия ячеек трехмерной сетки

- геометрия типа «угловой точки» предназначена для сеток с неравномерным горизонтальным разрешением, т.е. размер ячеек которых варьируется по горизонтали. В данном случае положение каждой ячейки в пространстве описывается всеми тремя координатами всех ее восьми вершин, что значительно усложняет ее описание. Все ячейки данного типа сеток могут иметь произвольную длину и ширину, а их ребра могут быть наклонными. Благодаря этому в сетку можно встраивать разломы и проводить локальное измельчение сетки.

Горизонтальное разрешение трехмерной сетки определяет размер ячеек – шаг (или инкремент) по горизонтали – dX и dY . Размер ячеек по горизонтали в большинстве случаев задается одинаковым по направлениям X и Y на всей области моделирования. Размер ячеек определяет детальность геологической модели. Чем меньше ячейки, тем выше детальность модели и наоборот, чем большего размера ячейки, тем ниже детальность модели.

Размер ячеек трехмерной сетки определяется тремя основными принципами :

1. Соблюдение соответствия задаче моделирования. Так при построении оценочной модели размер ячеек должен быть значительно

больше, чем при построении детальной модели, на основе которой решаются практические задачи, например проектирование горизонтальных скважин и геонавигация при их бурении.

2. Соблюдение соответствия разрешающей способности наблюдений. Чем плотнее сетка скважин на участке моделирования, тем меньший размер ячеек при построении модели должен использоваться. Желательно, чтобы между скважинами было не менее 5 ячеек. При эксплуатационном разбуривании обычно берут размер ячейки по площади 25х25 или 50х50 м. При наличии только разведочных скважин и при большом размере модели – 100х100 или даже 200х200 м. Следует отметить, что при любом разрешении сетки возможно попадание нескольких скважин в одну ячейку. В этом случае необходимо уменьшить размерность dX и dY . Если это невозможно, то одна из скважин исключается из дальнейшего моделирования, например транзитная скважина или скважина дублер.
3. Соблюдение соответствия геологической неоднородности объекта моделирования. Для выдержанных пластов возможно задать больший размер ячеек, чем для неоднородных пластов. Размеры геологических тел должны превышать размер ячеек в 2-3 раза [1].

Желательно, чтобы горизонтальное разрешение трехмерной геологической сетки соответствовало требованиям гидродинамического моделирования, при условии соблюдения всех вышеописанных принципов. Другими словами, если размер ячеек в геологической модели выбран таким образом, то при переходе к гидродинамической модели нет необходимости проводить ремасштабирование трехмерной сетки по горизонтали.

Изучение методов создания структурно-стратиграфического каркаса позволит выбирать наиболее подходящий алгоритм для конкретной залежи с учётом особенностей её строения и объёма и видов исходных данных (прямых, косвенных и априорных), а значит строить каркас с наибольшей возможной точностью.

Литература по теме:

1. Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 199 с.
2. Бадьянов В.А. Методы компьютерного моделирования в задачах нефтепромысловой геологии. – Тюмень. Шадринск: Изд-во «Шадринский Дом Печати», 2010 – 135 с.
3. Баранов В.Е., Куреленков С.Х., Шевелева Л.В. Прикладное моделирование пласта: Учебное пособие. - Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела, 2007. -104 с.
4. Билибин С.И. Технология создания и сопровождения трехмерных цифровых геологических моделей нефтегазовых месторождений. Авторефе-

- рат дисс. докт. технич. наук. – М., 2010. – 45 с.
5. Белкина В.А., Бембель С.Р., Забоева А.А., Санькова Н.В. Основы геологического моделирования (часть 1): Учебное пособие. – Тюмень: - ТюмГНГУ, 2015. – 168с.
 6. Забоева А.А. Методика построения трёхмерной геологической модели [Текст]: Методические указания для лабораторных работ /сост. А.А. Забоева, В.А. Белкина – Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. – 40 с.
 7. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009 – 376с.

Тема 3. Изучение методов аппроксимации, используемых при создании цифровых моделей залежей. Оценка их точности и область использования

Целью самостоятельной работы является углублённое изучение методов создания (интерполяции и аппроксимации) цифровых геологических моделей, понимание их достоинств и недостатков. На этом понимании базируется выбор метода построения модели конкретной залежи, который позволяет добиться максимально возможной точности.

Все алгоритмы моделирования можно разделить на две группы (рис. 3.1):

1. Детерминистские – при одних и тех же настройках дают один, наиболее вероятный, при заданных условиях, результат [2]. Классическим примером детерминистского алгоритма моделирования является кригинг;
2. Стохастические (вероятностные) – позволяют получать при одних и тех же настройках различные равновероятные случайные реализации [2].

За историю развития геологического моделирования создано много алгоритмов стохастического моделирования, их можно разделить на две группы:

1. Пиксельные – основанные на последовательном поочередном (попиксельном) заполнении объема геологической сетки значениями моделируемого параметра. Основными представителями данного вида алгоритмов являются последовательное индикаторное моделирование (Sequential Indicator Simulation – SIS) и усеченное гауссово моделирование (Truncated Gauss Simulation – TGS). Используются алгоритмы SIS и TGS в основном при моделировании гетерогенных фаций, подвергшихся диагенетическим изменениям или не имеющих явно выраженной геометрической формы. Эти алгоритмы требуют:

- оценки процентного содержания каждой из фаций в объеме моделируемого объекта;
- задание модели полувариограммы.

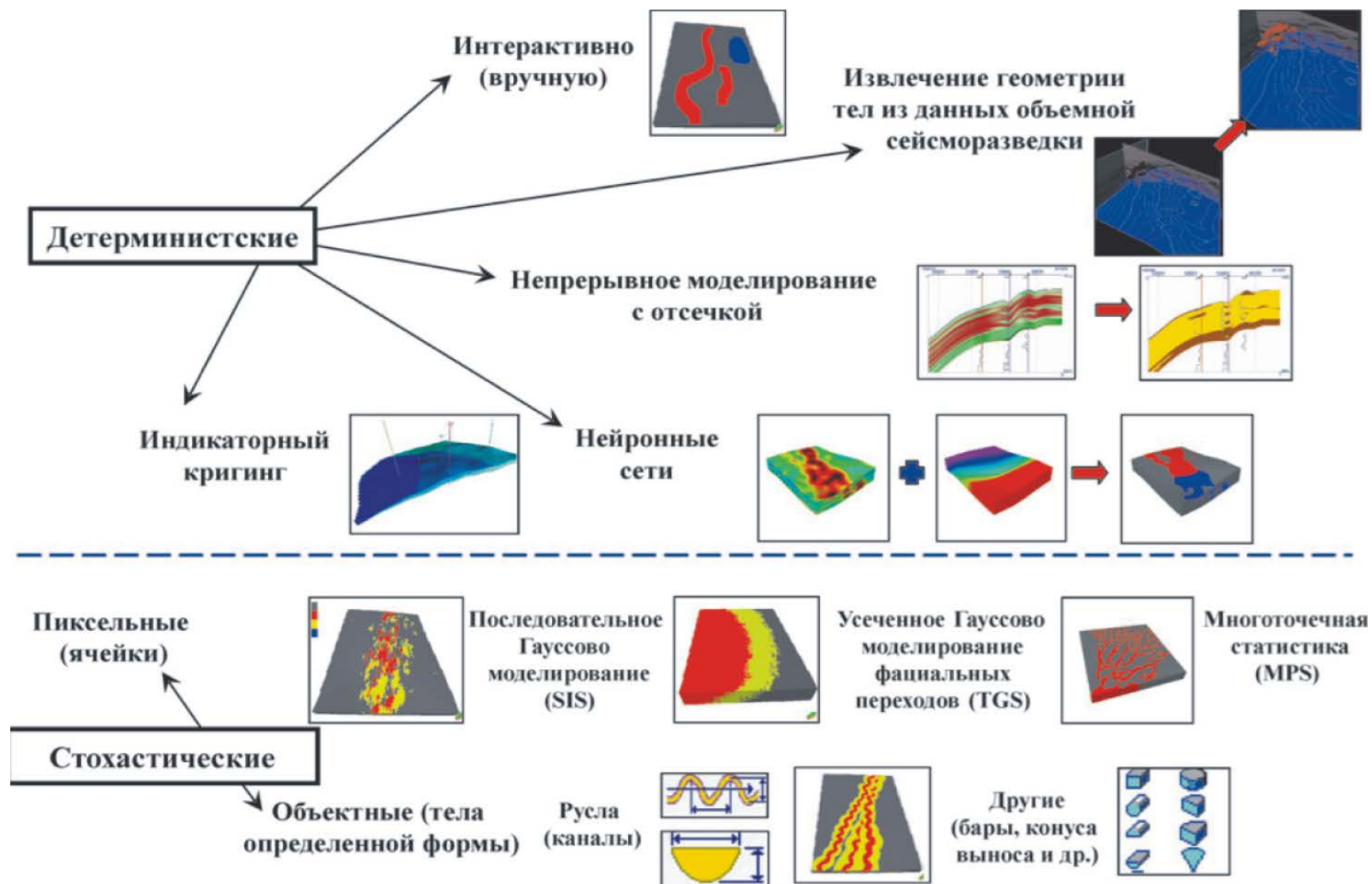


Рис. 3.1 Примеры алгоритмов моделирования (Закревский К.Е.)

Алгоритм TGS дает лучшие результаты, если моделируемые фации упорядочены в пространстве согласно априорной закономерности (например, когда моделируется переход от фаций мелкого шельфа к глубоководноморским).

2. Объектно-ориентированные (булевые) – моделирование параметра в резервуаре производится на основе априорной информации о геометрии геологических тел: размера, формы, ориентации в пространстве. При этом форма моделируемого объекта может быть задана уравнениями, растровыми схемами или комбинациями того и другого. Данную группу алгоритмов рекомендуется использовать при моделировании отложений речных русел (как меандрирующих, так и спрямленных), эоловых дюн, фронтальных частей дельт, карбонатных платформ и т.д. Кроме того, при высоких значениях коэффициента песчаности (более 80 %) рекомендуется моделировать глинистые пропластки как объекты внутри песчаной матрицы.

Объектные модели, созданные объектно-ориентированными алгоритмами, визуально часто представляются довольно реалистичными, так как полученная картина распределения фаций повторяет, хотя и в идеализированной форме, геометрию объектов, которые можно встретить в обнажениях горных пород и в современных аналогах обстановок осадконакопления [1].

Основные параметры, которые задаются при объектно-ориентированном моделировании:

- форма тела и его параметры (например, длина и ширина канала в разрезе, направление, амплитуда и длина его изгиба в плане);
- распределение объектов в пространстве и их взаимодействие друг с другом. Следуя принятой седиментационной модели, объекты могут группироваться, например, создавать латеральную аккрецию или распределяться независимо, вышележащие тела могут эродировать ниже лежащие и т.д. Важно отметить, что пропорциональное соотношение фаций в полученном распределении не должно противоречить скважинным данным и принятой седиментационной модели;
- данные для ограничения полученных реализаций – полученные реализации должны соответствовать имеющимся прямым и косвенным данным: скважинной информации, сейсмическим данным, региональным геологическим данным и предполагаемой модели осадконакопления [1].

В настоящее время активно используется метод многоточечной статистики (MPS – multiple-pointstatistics), который, будучи пиксельным, приближается по своим возможностям учета строения геологических тел к объектно-ориентированным методам. В отличие от SIS, в методе MPS для оценки вероятности кода фации в ячейке трехмерной сетки используется не полувариограмма, а обучающее изображение (TI – trainingimage) и коды фаций в скважинах. Основные особенности MPS:

- высокая скорость работы при большом числе скважин;
- простота задания концептуальной седиментационной модели;

- высокая реалистичность.

Фациальная модель, построенная методом MPS, остается пиксельной, что не позволяет использовать тренды для тел, и стохастической – многовариантной. Сложность использования MPS связано с тем, что ТП обязательно должно быть трехмерным. Его можно нарисовать вручную или можно создать с помощью объектных моделей без скважин. В настоящее время идет активный процесс создания библиотек ТП для различных условий осадконакопления [3].

Каждая из групп алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки. Краткий их перечень приведен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнительная характеристика детерминистских и стохастических методов моделирования

Детерминистские методы	Стохастические методы
• работают быстрее; • применяются при большом количестве исходных данных.	• отличаются большей гибкостью при привлечении различных трендов; • дают возможность провести оценку неопределенности; • могут использоваться при малом количестве исходных данных.

Выбор того или иного алгоритма моделирования зависит от ряда факторов, которые можно разделить на две группы:

1. Объективные – те, которые будут существовать всегда:
 - полнота и качество исходных данных;
 - концептуальная модель моделируемого объекта;
 - конечная цель создания 3D ГМ.
2. Субъективные, наличие которых определяется ограничениями временных и технических ресурсов:
 - количество времени, предоставленного на создание ГМ;
 - аппаратные возможности персонального компьютера.

Как показывает опыт, более хорошие результаты моделирования получают при комбинировании различных алгоритмов [3].

Стандартные алгоритмы и методики моделирования современных программных комплексов дают широкие возможности в области реализации концептуального видения геологического строения моделируемого объекта. Однако для максимально эффективного применения стандартных возможностей программного комплекса необходимо устанавливать настройки согласно особенностям геологического строения моделируемого объекта. Для этого необходимо:

1. понимание математических основ применяемого алгоритма;

2. изучение физических и геологических основ процесса формирования объекта моделирования. Например, понимание общих и частных закономерностей процесса осадконакопления во времени и пространстве имеет огромное практическое значение для успешного прогнозирования размеров и форм природных резервуаров, распространения ФЕС, а следовательно и запасов УВС.

Создание 3D ГМ объекта, характеризующегося определенными индивидуальными особенностями строения, итерационный процесс, в ходе которого подбираются, как оптимальные настройки алгоритмов моделирования, так и оптимальная последовательность этих алгоритмов.

Для более качественного создания 3D ГМ объекта выполняют многовариантное трехмерное геологическое моделирование. Например, в работе [37] построены ансамбли равновероятных реализаций литологических моделей методами индикаторного моделирования, многоточечной статистики и методом объединения моделей речных систем. В этой работе в качестве основы для создания гидродинамических моделей рекомендованы геологические модели, построенные с помощью двух подходов: стохастического (метод SIS) и метода совмещения моделей русловых фаций и индикаторных моделей.

Литература по теме:

1. Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 199 с.
2. Дюбрюль О. Геостатистика в нефтяной геологии. – Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 256 с.
3. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009 – 376 с.

Тема 4. Создание концептуальной седиментационной модели. Особенности ее учета при построении 3D модели.

Целью самостоятельной работы является знакомство с основными видами концептуальных моделей, ознакомление с методикой создания концептуальной седиментационной модели и особенностями учета ее при построении 3D модели.

Концептуальная модель – это формализованные на основе имеющегося фактического материала представления о геологическом строении моделируемых объектов: представления о стратиграфии, тектонике, седиментации отложений, их морфологии и закономерностях пространственного изменения пород с учётом постседиментационного преобразования [4].

Помимо описания базовых элементов концептуальная модель содержит информацию о наличии региональных перерывов в осадконакоплении, эрози-

онных процессах, положении источников сноса, условий осадконакопления, литолого-фациальном составе отложений и сведения о преобладающих типах ловушек.

Составляющими частями концептуальной модели являются седиментационная и тектоническая модели [2].

При создании седиментационной модели в большинстве случаев объектом является не отдельный слой, а более или менее значительная группа слоев, составляющая стратиграфический горизонт или часть его. Конечно, нельзя объединять отложения, образовавшиеся в резко отличных условиях. Сформировавшиеся в сходных условиях слои вполне могут быть объединены, несмотря на различие в их литологическом составе.

Построение корректной седиментационной модели необходимо выполнять с использованием региональных геологических исследований (региональные палеогеографические реконструкции), а также фактический материал по рассматриваемому месторождению (керна и материалы ГИС).

На первом этапе создания концептуальной седиментационной модели выполняется анализ региональных палеогеографических реконструкций, который позволяет сформировать принципиальное понимание условий осадконакопления определенного интервала разреза (континентальные или морские обстановки и т.п.), определить основные источники сноса, области транзита и конечной аккумуляции осадков. В дальнейшем выполненные региональные исследования позволяют выработать принципы выделения пластов и корреляции стратиграфических горизонтов, что дает возможность однозначно выделять геологические тела в разрезе и проследивать их площадное распространение.

На следующем этапе исследований выполняют палеогеографические реконструкции на конкретном месторождении или группе месторождений. Эта работа предусматривает комплексное изучение керна, материалов ГИС поисковых, разведочных и эксплуатационных скважин, сейсморазведки 3D в масштабе месторождения. Пример таких палеогеографических реконструкций приведен в [2]. Параллельно с анализом фаций данные скважин и сейсморазведки используются для палеотектонического анализа.

Корректно построенная концептуальная седиментационная модель месторождения позволяет создать более детальную и корректную цифровую геологическую модель. Для создания такой модели необходимо иметь карты распространения фаций (обстановок осадконакопления), обоснование способов моделирования фаций и их переходов в разрезе и по площади, обоснование форм и размеров геологических тел, обоснование статистических характеристик и параметров полувариограмм для каждой фации, обоснование вертикальных и латеральных литологических и петрофизических трендов для фациальных областей, обоснование выбора геометрии сеток для разных пластов.

В настоящее время в наиболее цельном и законченном виде для построения концептуальной седиментационной модели применяется методика сиквенс-стратиграфии, широко используемая по всему миру. Сиквенс-стратиграфия

– это раздел стратиграфии, использующий комплексный анализ осадочных образований, основанный на расчленении осадочного бассейна на генетически связанные фации в пределах хроностратиграфически значимых поверхностей. То есть отложения, заключенные между этими поверхностями, формировались в течение определенного времени, фиксируемого возрастом этих поверхностей [4].

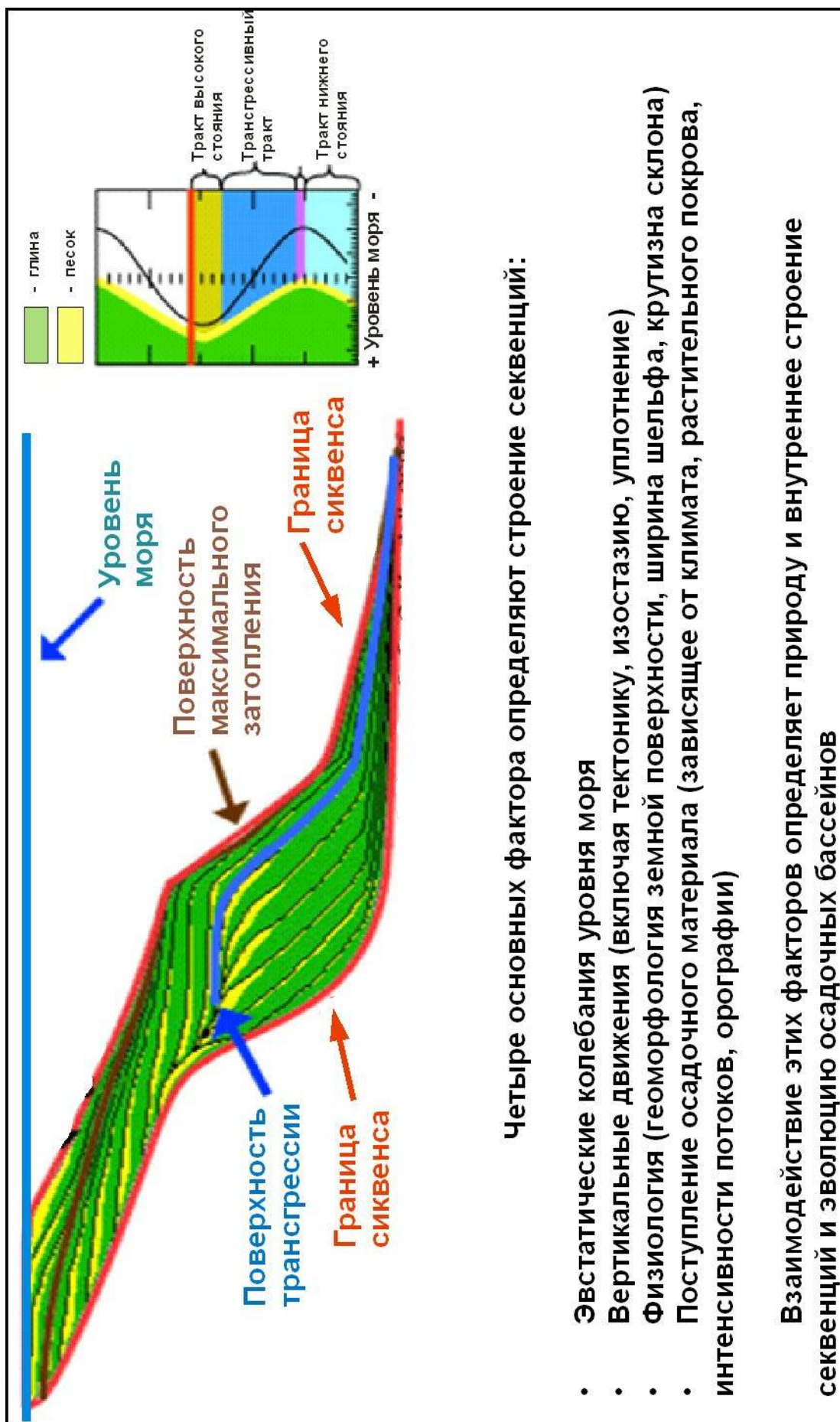
Основное понятие – сиквенс. Это стратиграфическая единица, которая состоит из относительно согласной последовательности генетически связанных слоев. Она ограничена границами региональных несогласий, образована за один седиментационный цикл. Региональные стратиграфические сиквенсы охватывают весь бассейн седиментации или его отдельные крупные части. Их граничные поверхности отчетливы в краевых частях бассейнов и часто неразличимы в глубоководных разрезах [4].

Образование сиквенсов происходит в результате циклического заполнения осадками бассейна седиментации. Периодическое изменение геометрии и объема бассейна является откликом на колебания относительного уровня моря. Последнее обусловлено тремя главными факторами: эвстазией, прогибанием дна бассейна и поступлением осадочного материала (рис. 4.1). Важную роль играет также и палеоморфология земной поверхности. Роль каждого из этих факторов в конкретном районе может быть различной [4].

В зависимости от скорости формирования бассейна и скорости привноса осадочного материала во время этих периодов возможны различные варианты формирования сиквенса и распределения в пространстве разных литологических типов пород.

Сиквенс-стратиграфия расчленяет осадочный разрез хроностратиграфическими границами, обеспечивающими надежный каркас для корреляции и правильного построения цифровой модели резервуара. Эти границы (поверхности) представляют особый интерес, так как они часто являются препятствиями на пути движения флюида. Кроме того, с позиций сиквенс-стратиграфии можно определить геометрию осадочных тел, например, пойм и русел, заполняющихся песчаными и глинистыми отложениями при повышении уровня моря, что имеет практическую ценность как при стохастическом пиксельном, так и, особенно, при объектном фациальном моделировании [4].

Таким образом, при создании седиментационной концептуальной модели, при детальной корреляции разрезов пластов основная роль отводится идентификации отложений по литолого-стратиграфическим признакам, важнейшим из которых является цикличность осадконакопления. Под цикличностью понимается закономерная повторяемость комплексов пород, генетически связанных между собой и характеризующихся направленностью изменения фаций по разрезу [6, 10].



Четыре основных фактора определяют строение секвенций:

- Эвстатические колебания уровня моря
- Вертикальные движения (включая тектонику, изостазию, уплотнение)
- Физиология (геоморфология земной поверхности, ширина шельфа, крутизна склона)
- Поступление осадочного материала (зависящее от климата, растительного покрова, интенсивности потоков, орографии)

Взаимодействие этих факторов определяет природу и внутреннее строение секвенций и эволюцию осадочных бассейнов

Рис. 4.1 – Схематическое строение сиквенса [4]

Корреляция разрезов скважин с помощью выявленных закономерностей циклического строения пластов учитывает всю совокупность признаков: литологический состав, толщины пластов и циклитов, характер их залегания, границы между ними и их площадное распространение. Разрезы сопоставляются не по принципу визуального подобия конфигураций диаграмм ГИС, а с учетом условий осадконакопления.

В качестве примера такого подхода к корреляции, заключающегося в комплексном подходе к определению повторяющихся интервалов разреза и сопоставлению их по площади, приведено расчленение сеноманских отложений одного из месторождений севера Западной Сибири (рис. 4.2). Рассматриваемые отложения формировались преимущественно в континентальных условиях, лишь в отдельные промежутки времени накапливались прибрежно-морские и морские отложения. Анализ данных ГИС и керн показывает, что в общем случае сеноманские отложения представлены интервалами высоко- и низкопроницаемых пород, которые постепенно сменяют друг друга вверх по разрезу. Таким образом, по керновым данным и на диаграммах ГИС в указанном направлении будет отмечаться уменьшение зернистости пород и смена песчаных прослоев глинистыми. Такая цикличность осадконакопления обусловлена жизненным циклом реки, который в общем случае представляет собой последовательность фаций аллювиальной равнины. Нижняя часть разреза представлена отложениями фаций русловых отмелей, сложенных преимущественно песчаными песчаными разностями. Вверх по разрезу эти отложения сменяются осадками внешней части поймы, которые представлены переслаиванием песчано-алевритовых и глинисто-алевритовых пород. Завершается цикл осадконакопления формированием глинистых прослоев внешней части поймы.

На диаграммах ГИС подобный характер изменения литологического состава отражается в смене к кровле циклитов отрицательных отклонений на положительные на диаграммах ПС, в уменьшении показаний на диаграммах кажущегося сопротивления (КС) и в увеличении – на ГК. При этом следует учитывать, что не во всех скважинах удастся проследить полный цикл осадконакопления, это может быть обусловлено размывами, эрозионными врезами и т.п. Описанный подход позволяет учесть при выполнении корреляции особенности осадконакопления отложений, что в дальнейшем позволит создать более достоверную геологическую модель.

Подобный подход также можно применить при корреляции прибрежно-морских и морских отложений месторождений Западной Сибири (шельфовые и ачимовские пласты неокома), только в этом случае цикличность осадконакопления обусловлена трансгрессивно-регрессивным режимом осадконакопления. Во время трансгрессий моря накапливались преимущественно глинистые осадки. При последующем регрессивном этапе седиментационного цикла формировались песчано-алевритовые тела, перекрываемые на следующем этапе трансгрессии глинами. Регрессивный характер осадконакопления проявляется в увеличении вверх по разрезу размера зерен породообразующих минералов. На ка-

ротажных диаграммах это выражается в общем наклонном характере КС, от минимальных значений в подошве циклита до максимальных значений в кровле пласта, в смене в этом же направлении положительных аномалий на отрицательные на диаграммах ПС, а также в уменьшении показаний к кровле циклита на диаграммах ГК. Трансгрессивные циклиты имеют обратную закономерность изменения конфигурации диаграмм ГИС.

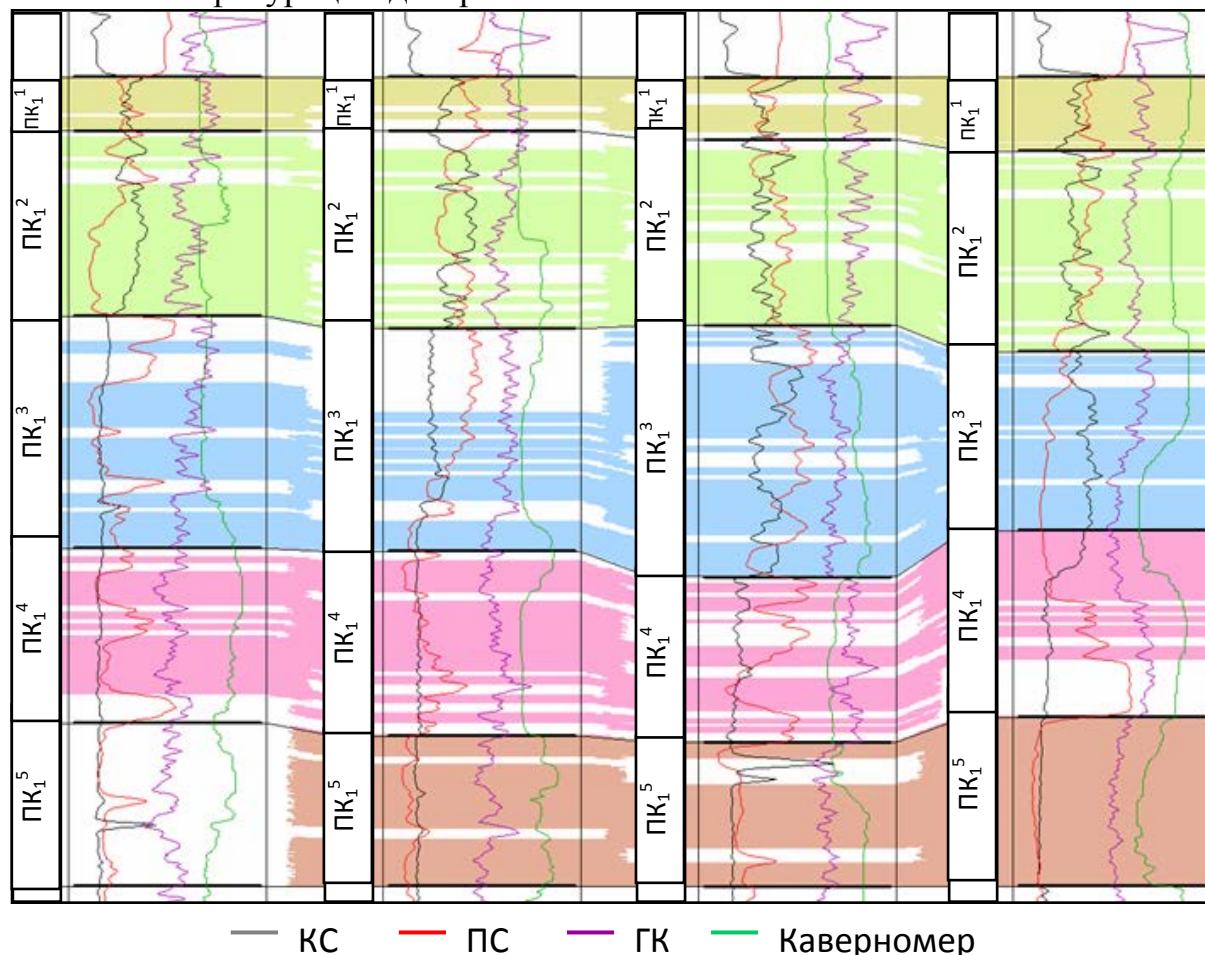


Рис. 4.2 – Схема корреляции сеноманских отложений одного из месторождений севера Западной Сибири

Полученные результаты построения концептуальной седиментационной модели используются для построения структурного каркаса (результаты корреляции) и создания литолого-фациальной модели (результаты моделирования условий осадконакопления).

Знание на начальном этапе элементов седиментационного и тектонического строения в региональном плане позволяет обосновать методику моделирования и, тем самым, уменьшить число итераций при построении модели. Концептуальная модель позволяет обосновать параметры и типы расчётных секций, настроить параметры алгоритмов моделирования.

Литература по теме:

1. Алексеев В.П. Литолого-фациальный анализ: Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Литология». – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. – 147с.
2. Белкина В.А., Бембель С.Р., Забоева А.А., Санькова Н.В. Основы геологического моделирования (часть 1): учебное пособие. – Тюмень: - ТюмГНГУ, 2015. – 168 с.
3. Ботвинкина Л.Н., Алексеев В.П. Цикличность осадочных толщ и методика ее изучения. – Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1991. – 336 с.
4. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009. – 376 с.
5. Изотова Т.С., Денисов С.Б., Вендельштейн Б.Ю. Седиментологический анализ данных промысловой геофизики. – М.: Недра, 1993. – 176 с.
6. Карагодин Ю.Н. Седиментационная цикличность. – М.: Недра, 1980. – 242 с.
7. Лидер М.Р. Седиментология. – М.: Мир, 1986. – 439 с.
8. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. – Л.: Недра, 1984. – 260 с.
9. Нежданов А.А. Геологическая интерпретация сейсморазведочных данных //Курс лекций для студентов специальностей 080400 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» и 080500 «Геология нефти и газа». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. – 133 с.
10. Нежданов А.А. Некоторые теоретические вопросы циклической седиментации//Литмологические закономерности размещения резервуаров и залежей углеводородов. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 60-79.
11. Рединг Х.Г., Коллинсон Дж.Д., Аллен Ф.А. и др. Обстановки осадконакопления и фации: В 2-х т. Пер. с англ. Т.1. – 352 с., Т.2 – 384 с. – М.: Мир, 1990.
12. Селли Р.К. Древние обстановки осадконакопления. – М.: Недра, 1989. – 294 с.

Задание: изучить этапы создания концептуальной седиментационной модели, научиться выполнять палеографические реконструкции на примере конкретных месторождений.

Тема 5. Создание концептуальной тектонической модели. Особенности ее учета при построении 3D модели.

Целью самостоятельной работы является знакомство с методикой создания концептуальной тектонической модели и особенностями учета ее при построении 3D модели.

Для построения тектонической модели, как и для построения седиментационной, используются данные различного масштаба, точности и методов различной физической природы: описания керна и обнажений, сейсмической интерпретации, грави-, магниторазведки и фотоснимков и др.

Основными этапами создания тектонической модели (рис. 5.1) являются:

- выбор принципов обоснования и трассирования нарушений разных пластов;
- обоснование наиболее значимых нарушений и организации их в тектоническую модель для каждого пласта;
- прогноз влияния нарушений разных пластов на их гидродинамическую связность;
- прогноз зон сжатия и разуплотнения пород (трещиноватости);
- выбор геометрии сеток для разных пластов (совместно с седиментационной моделью).

На сегодняшний день определяющую роль в построении тектонической модели играют данные 3D сейсморазведки, позволяющие протрассировать и увязать в единую систему нарушения для каждого пласта (группы пластов) в разрезе. На основе этой информации выполняется палеотектонический и тектонофизический анализы, дающие вместе целостную картину тектонического развития территории за геологическое время, оценить степень влияния нарушений друг на друга и на геологическую модель резервуара.

Основным фактором, предопределяющим последовательность распределения фациальных обстановок по площади и в разрезе является палеорельеф. Реконструкции палеорельефа на качественном уровне проводятся с помощью **палеотектонического анализа**. Палеотектонический анализ изучает влияние конседиментационных и постседиментационных тектонических процессов на формирование коллекторов нефти и газа и нефтегазовых залежей. Таким образом, он оценивает тектоническую и седиментационную составляющие концептуальной модели.

Палеотектонический анализ проводится на основе изучения изменения толщин стратиграфических пачек пород. Палеотектонические разрезы строятся по кровлям стратиграфических горизонтов. Кровля стратиграфического горизонта (поверхность выравнивания) имеет форму горизонтальной линии. Построения начинают с нижнего стратиграфического горизонта, последовательно наращивая разрез по мере перехода к вышележащим стратиграфическим горизонтам.

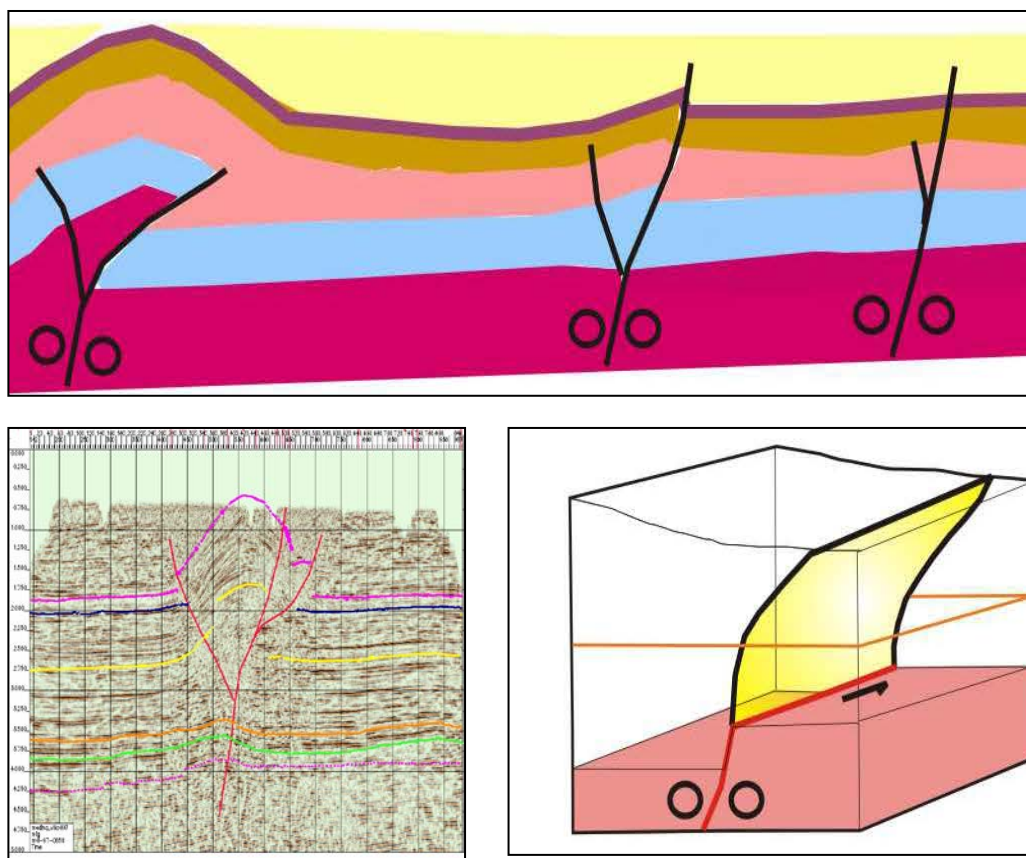


Рис. 5.1 – Тектоническая модель (по К.Е. Закревскому, 2012)

В процессе палеотектонического анализа выявляется дополнительная информация об условиях, времени и скорости образования стратиграфических комплексов посредством анализа толщин между стратиграфическими границами. Это позволяет реконструировать в геологическом времени этапы развития потенциальных ловушек углеводородов и прогнозировать характер их насыщения.

В качестве основных границ палеотектонического анализ выбирают изохронные реперные горизонты, связанные с поверхностями выравнивания территории. На временных сейсмических разрезах это, как правило, устойчивые отражающие горизонты (рис. 5.2). В разрезах скважин литологические различия таких границ идентифицируются по промыслово-геофизическим и литологическим характеристикам. Эти реперные горизонты имеют незначительную толщину и значительное площадное развитие. Одним из таких горизонтов в Западной Сибири является опорный отражающий горизонт Б (рис. 5.2), приуроченный к отложениям баженовской свиты мощностью от 5-10 до 20-40 м (верхняя юра). Отложения баженовской свиты представлены уплотнёнными битуминозными, карбонатно-кремнисто-глинистыми породами. Именно аномальные свойства пород баженовской свиты, отличающиеся от выше и ниже залегающих отложений, формируют высокоамплитудный ОГ Б, являющийся региональным репером на территории Западной Сибири.

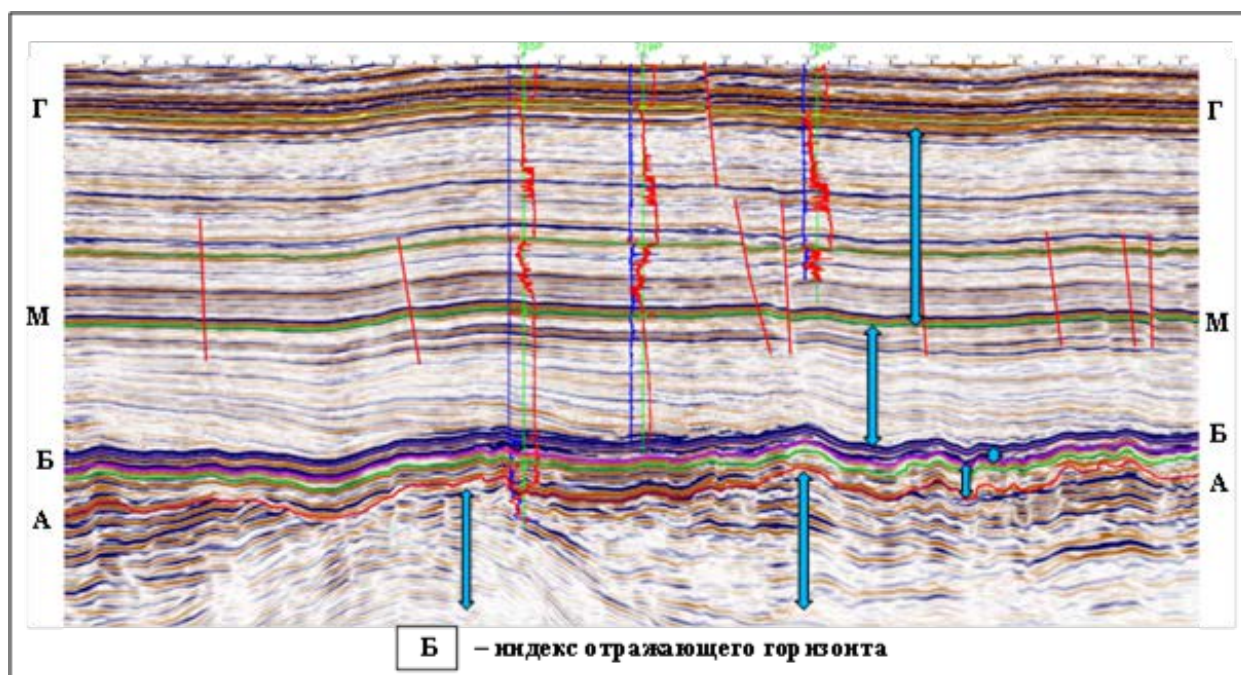
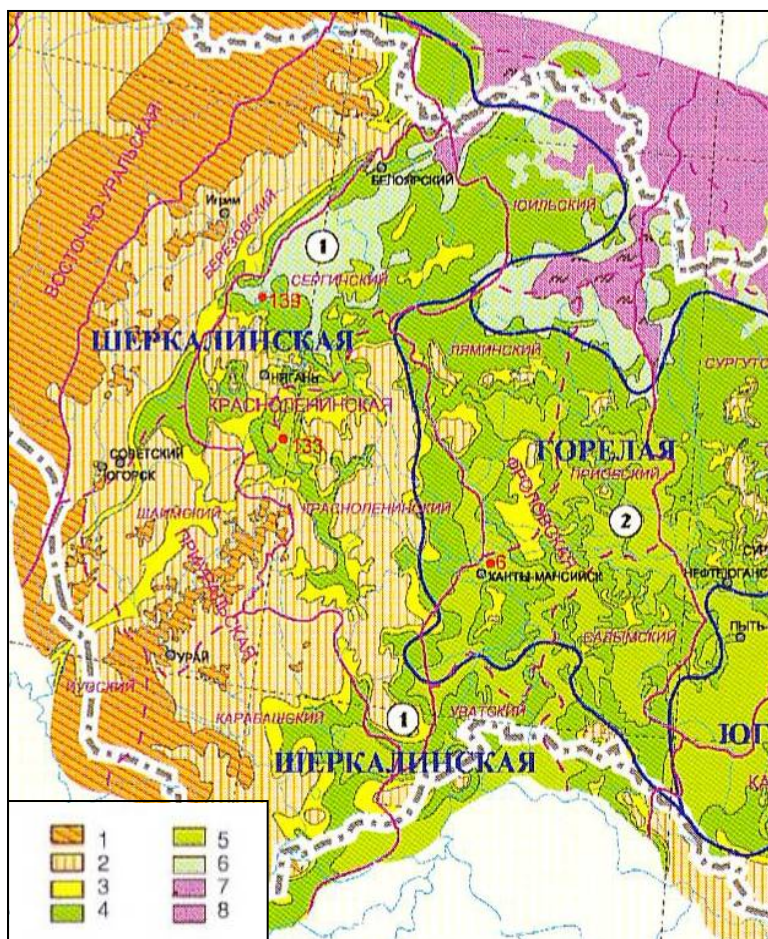


Рис. 5.2 – Фрагмент временного разреза на одном из месторождений Среднего Приобья (Западная Сибирь)

Карты толщин, построенные между реперными горизонтами (поверхностями выравнивания), тесно связаны с палеорельефом на время формирования изучаемого интервала разреза. Например, карта изопакит толщи между ОГ А и ОГ Б отражает особенности палеорельефа на время формирования практически всего интервала юрских отложений. Увеличение толщин интервала на отдельных участках свидетельствует о заполнении прогибов нижнеюрскими осадками, представляющими нефтепоисковый интерес особенно в западной и юго-западной частях ХМАО-Югры. Смысловая интерпретация полученных карт толщин зависит от того, к какой фациальной группе отнесён изучаемый интервал (рис. 5.3).

Активными элементами формирования палеорельефа являются тектонические нарушения, контролирующие распределение фациальных обстановок. Выделение и трассировка тектонических нарушений может проводиться непосредственно на временных разрезах МОГТ (метод общей глубинной точки), с трассированием по кубу 3D сейсмических исследований – рис. 5.4, по градиенту наклона структурной поверхности отражающего горизонта, данным вещественной неоднородности пород фундамента, результатам наземной съёмки (аэрофотосъёмка, гравиметрическая, магнитная и др.).

В тектонически активных областях седиментационная и тектоническая концептуальные модели особенно неразрывно связаны друг с другом, поскольку только совместный анализ тектонических и седиментационных процессов позволяет воссоздать адекватную модель нефтегазового резервуара.



Условные обозначения: Палеогеографические области: 1 – холмогорья; 2 – эрозионно-денудационные пологоувалистые равнины; 3 – денудационно-аккумулятивные равнины. Равнины аккумулятивные: 4 – озерно-аллювиальные; 5 – низменная аккумулятивная с неустойчивым режимом осадконакопления; 6 – прибрежная, временами заливаемая морем; 7 – дельтовая субаквальная; 8 – солоновато-водный бассейн.

Рис. 5.3 – Фрагмент схемы фациального районирования нижнеюрских отложений на территории ХМАО-Югры [3]

Концептуальная тектоническая модель используется на последнем этапе построения трёхмерной геологической сетки – встраивания в нее модели разломов. Обычно это происходит на основе модели разломов, построенной на этапе структурного моделирования и согласованной со структурными поверхностями. Если при построении трёхмерной геологической сетки использовать только эти поверхности, без модели разломов – сетка будет некорректной. Вместо разломов в такой сетке появятся изгибы слоев, напоминающие флексуры. При использовании же модели разломов слои сетки будут сдвинуты на необходимую амплитуду, при этом нумерация слоев не изменится [4].

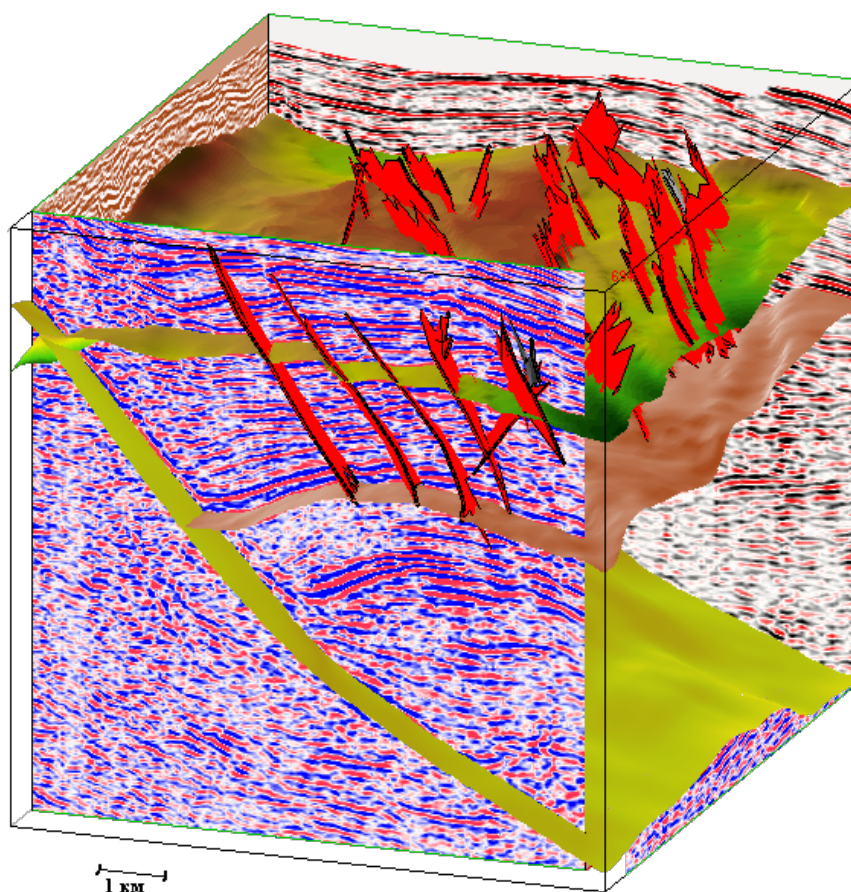


Рис. 5.4 – Пример выделения и трассирования тектонических нарушений по кубу сейсмических данных

Следует отметить, что в настоящее время разрешающая способность данных сейсморазведки и методы обработки позволяют выделить большое количество малопротяженных разломов без смещения. Уровень детализации полученной в результате структурной модели, безусловно заслуживает внимания, но едва ли может быть отображен при геологическом и гидродинамическом моделировании. Таким образом, необходимо определить критерии включения тектонических нарушений в геологическую модель. В геологическую модель следует включать:

- нарушения, разделяющие блоки с разными отметками флюидных контактов;
- наиболее протяженные и амплитудные нарушения;
- нарушения с амплитудой более половины толщины пласта.

Литература по теме:

1. Белкина В.А., Бембель С.Р., Забоева А.А., Санькова Н.В. Основы геологического моделирования (часть 1): учебное пособие. – Тюмень: - ТюмГНГУ, 2015. – 168 с.

2. Гзовский М.В. Практическое применение структурно-геодинамического картирования для поиска тектонических нарушений и решения оползневых задач. Тектонофизика. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1995.
3. Геология и нефтегазоносность Ханты-Мансийского автономного округа: атлас / сост.и подгот. к изд. ГП ХМАО «Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана». – Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2004. –146 с.
4. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009. – 376 с.
5. Нежданов А.А. Геологическая интерпретация сейсморазведочных данных //Курс лекций для студентов специальностей 080400 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» и 080500 «Геология нефти и газа». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. – 133 с.

Задание: научиться выполнять палеотектонические реконструкции, выявление и трассирование тектонических нарушений на примере конкретных месторождений.

Тема 6. Анализ анизотропии распределения литофаций в изучаемой залежи Обоснование числа и видов трендов, алгоритма моделирования литофациальной модели (ЛФМ), исходя из целей и задач трехмерного геологического моделирования. Анализ качества ЛФМ.

Целью самостоятельной работы является:

- получить представление об этапах создания ЛФМ;
- научиться проводить вариограммный анализ и применять полученные результаты при настройке алгоритма моделирования;
- научиться определять вид трендов, исходя из особенностей геологического строения объекта моделирования и задач геологического моделирования;
- научиться определять критерии оценки качества ЛФМ исходя из задач геологического моделирования.

После ввода исходных данных, анализа их точности и создания концептуальной модели, начинается этап создания 3D ЛФМ. Если двухмерная ЛФМ является дискретной, то алгоритмы построения 3D ЛФМ должны это учитывать. При построении 3D ЛФМ надо учитывать, что для разных типов пород характерны разные форма и размер фациальных тел, анизотропия распределения ФЕС по латерали и разрезу, функции относительной фазовой проницаемости (ОФП) и капиллярные давления.

Повышение детализации литолого-фациальной модели требует пропорционального увеличения объема исходных данных и временных трудозатрат.

Можно выделить шесть основных этапов создания ЛФМ:

1. подготовка и проверка качества исходных данных;
2. выбор и подготовка трендов;
3. анализ анизотропии распространения литофаций;
4. обоснование алгоритма моделирования;
5. создание куба литофаций;
6. анализ качества и соответствия полученного куба исходным данным.

В качестве исходных данных при создании ЛФМ используются:

- результаты литологического расчленения разрезов скважин;
- детальное описание и интерпретация керна;
- качественная и количественная интерпретация данных 3D сейсморазведки;
- концептуальная седиментационная модель (табл. 1.1).

Тренд (англ. trend – направление, тенденция) – основная тенденция в изменении геологических характеристик по площади или по разрезу.

Существует три вида трендов:

- одномерные (1D – вертикальные);
- двумерные (2D – латеральные);
- трехмерные (3D) [7].

В качестве 1D трендов используются геолого-статистические разрезы, которые представляют собой дифференцированные графики распределения относительного содержания (вероятностей появления) коллекторов по разрезу.

2D или горизонтальными трендами могут служить карты песчанистости ($k_{\text{песч}}$), карты сейсмических атрибутов или комбинации сейсмических атрибутов, прогнозные карты моделируемого параметра, построенные по данным сейсморазведки. При построении трендовых карт необходимо привлекать всю имеющуюся косвенную и априорную информацию о строении объекта моделирования. Например, в случае глинизации пласта при построении карт $k_{\text{песч}}$, необходимо учесть ту или иную модель глинизации – выклинивания или замещения.

В качестве 3D трендов используют кубы, полученные при обработке сейсмических атрибутов, так же возможно использование кубов, построенных на основе 1D и 2D трендов.

Возможно комбинирование трендов разного вида, например 3D с 1D или 2D. Выбор того или иного вида трендов при построении модели литофаций зависит от количества и вида исходных данных, особенностей геологического строения моделируемого объекта и конечных целей создания модели. Например, при малом количестве скважин и отсутствии сейсмических данных, позволяющих уточнить строение объекта моделирования в межскважинном пространстве, рекомендуется использовать 1D тренды. Если же существует кон-

цептуальная седиментационная модель, есть результаты интерпретации данных сейсморазведки, то необходимо создавать 2D и 3D тренды.

Анизотропия – это характеристика, отображающая зависимость параметров распределения от направления. Стандартно оценка анизотропии проводится на основе вариограммного анализа. Полувариограмма – функция зависимости полудисперсии (или изменчивости параметра) от расстояния между точками наблюдения (рис. 6.1).

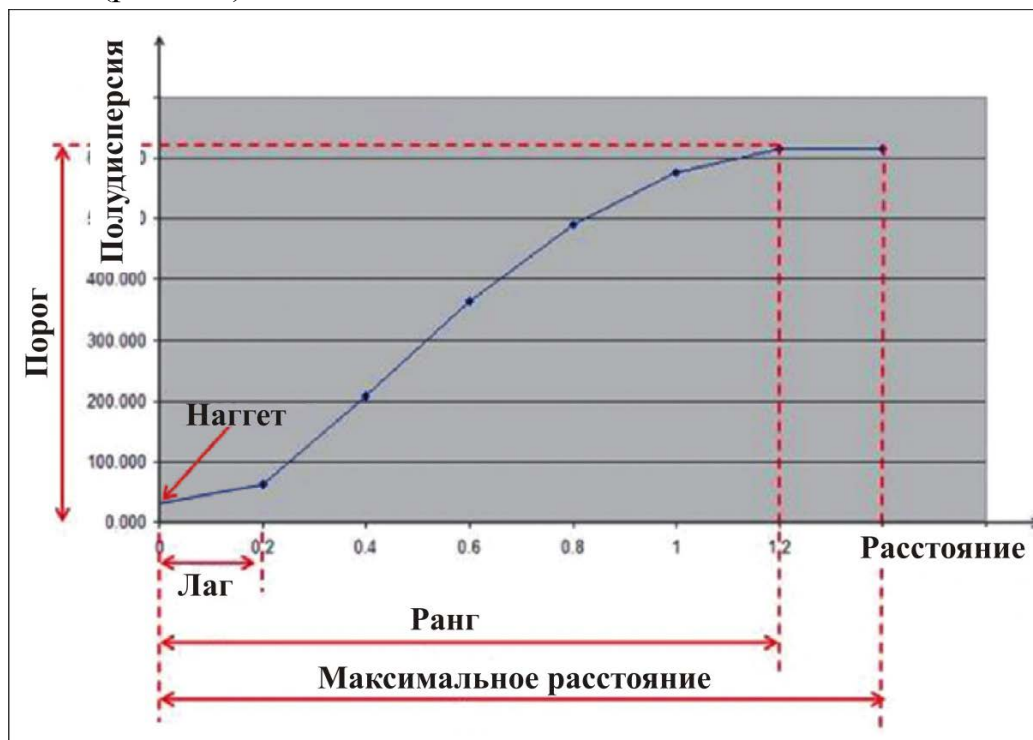


Рис. 6.1 – Элементы полувариограммы (Закревский К.Е.)

Вариограммный анализ проводится на основе скважинных данных, кубов или карт сейсмических атрибутов, для которых найдены корреляционные зависимости с моделируемым параметром (например, акустический импеданс – пористость).

На графике полувариограммы по оси X откладывается расстояние между парами измеренных значений (лаг), а по оси Y – степень различия между этой парой точек (полудисперсия).

Основные элементы полувариограммы:

- полудисперсия – степень различия между парой точек исходной информации;
- порог – значение полудисперсии, на котором функция полувариограммы выходит на постоянное значение;
- лаг – расстояние между сравниваемыми точками;
- ранг – расстояние, в пределах которого значение параметра в рассматриваемых точках коррелируется. Когда расстояние между точками превышает ранг, то дисперсия между этими точками стано-

вится непредсказуемой. Ранг полувариограммы определяет, на каком расстоянии выбираются замеры для расчета интерполяционного значения. Следует отметить, что существенное влияние на величину моделируемого параметра в данном месте оказывают точки, расположенные на расстоянии примерно $1/3$ ранга полувариограммы;

- наггет – случайная составляющая дисперсии измерений, которая определяет насколько велико различие значений в очень близко расположенных точках.

Для использования полувариограммы при работе алгоритма моделирования, необходимо аппроксимировать ее одной из стандартных математических моделей полувариограмм – сферической, экспоненциальной, гауссовой (рис. 6.2).

Сферическая полувариограмма самая распространенная. Она характеризует плавное равномерное увеличение дисперсии между данными до определенного максимума. Экспоненциальная модель полувариограммы характеризуется быстрым нарастанием дисперсии, при этом она лишь стремится к максимальной дисперсии, никогда не достигая ее. Для гауссовой полувариограммы характерно вначале медленное нарастание дисперсии, затем ускорение и ближе к максимальной дисперсии замедление роста полувариограммы.

После того, как по экспериментальным точкам выбрана модель полувариограммы и определены ее характеристики, вычисляется оценки значения моделируемого параметра в каждой точке межскважинного пространства на основе алгоритма кригинга.

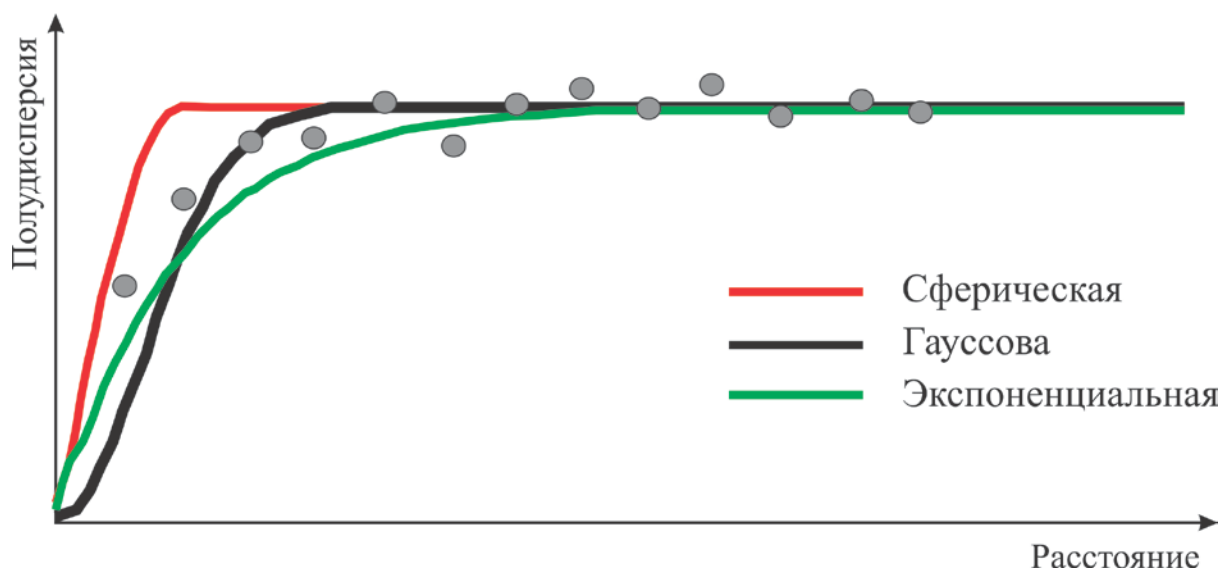


Рис. 6.2 – Виды математических моделей полувариограмм

Как было указано выше, все алгоритмы моделирования можно разделить

на две группы:

3. Детерминистские – при одних и тех же настройках дают один, наиболее вероятный, при заданных условиях, результат. Классическим примером детерминистского алгоритма моделирования является кригинг;
4. Стохастические (вероятностные) – позволяют получать при одних и тех же настройках различные равновероятные случайные реализации.

Литература по теме:

1. Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 199 с.
2. Бадьянов В.А. Методика детального расчленения и корреляции неоднородных продуктивных горизонтов. Применение математических методов при обработке материалов нефтепромысловой геологии. Труды Гипротюменьнефтегаза. – Тюмень, 1972. – Вып. 30. – С.3-15.
3. Бадьянов В.А. Методы компьютерного моделирования в задачах нефтепромысловой геологии. – Тюмень. Шадринск: Изд-во «Шадринский Дом Печати», 2010 – 135 с.
4. Белозеров В.Б. Ловушки нефти и газа, моделирование залежей углеводородов. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2008. – 143 с.
5. Белозеров В.Б., Брылина НА, Даненберг Е.Е. Фациальная диагностика по материалам ГИС континентальных и прибрежно-морских отложений юры юго-востока Западной Сибири // Проблемы геологии и нефтегазоносности верхнепалеозойских и мезозойских отложений Сибири. – Новосибирск, 1991. – С. 171-180.
6. Дюбрул О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных. EAGE, 2007. – 296 с.
7. Дюбрюль О. Геостатистика в нефтяной геологии. – Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 256 с.
8. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009 – 376 с.
9. Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2008 – 272 с
10. Косентино Л. Системные подходы к изучению пластов. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2007. – 400 с
11. Курс Petrel по моделированию свойств. Schlumberger, 2004.
12. Лидер М.Р. Седиментология. – М.: Мир, 1986. – 439 с.
13. Лусиа Ф.Дж. Построение геолого-гидродинамической модели карбонатного коллектора: интегрированный подход. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хао-

тическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 384 с

14. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. – Л.: Недра, 1984. – 260 с.
15. Селли Р.К. Древние обстановки осадконакопления. – М.: Недра, 1989. – 294 с.
16. Хэллем Э. Интерпретация фаций и стратиграфическая последовательность: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 328 с.
17. Чернова Л.С. Литология и условия формирования резервуаров нефти и газа Сибирской платформы. – М.: Недра, 1988. – 254 с.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Абабков К.В., Сулейманов Д.Д., Султанов Ш.Х., Котенев Ю.А., Варламов Д.И. Основы трехмерного цифрового геологического моделирования: Учебное пособие. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 199 с.
2. Закревский К.Е. Геологическое 3D моделирование. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2009 – 376 с.
3. Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2008 – 272 с
4. Лусиа Ф.Дж. Построение геолого-гидродинамической модели карбонатного коллектора: интегрированный подход. – М., Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 384 с
5. Руководство пользователя IRAP RMS [Электронный ресурс]

Дополнительная:

1. Косентино Л. Системные подходы к изучению пластов. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2007. – 400 с
2. Белозеров В.Б. Ловушки нефти и газа, моделирование залежей углеводородов. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ЦППС НД, 2008. – 143 с.
3. Девис Д.С. Статистический анализ данных в геологии: Пер. с англ. В 2 кн./Пер. В.А. Голубевой; Под ред. Д.А. Родионова. – М.: Недра, 1990 – 319 с.
4. Гутман И.С. Методы подсчетов запасов нефти и газа: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1985. – 223 с.
5. Дойч К.В. Геостатистическое моделирование коллекторов. – М.: Институт компьютерных исследований, 2011. – 400 с.
6. Дюбрюль О. Геостатистика в нефтяной геологии – М.: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – 256 с.
7. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики – М.: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамики», 2009. – 460 с.

Учебное издание

**МЕТОДЫ ТРЁХМЕРНОГО ЦИФРОВОГО
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания
по проведению самостоятельной работы

Составители:

БЕЛКИНА Валентина Александровна,
ЗАБОЕВА Александра Александровна,
САНЬКОВА Наталья Владимировна

В авторской редакции

Подписано в печать 31.03.2016. Формат 60х90 1/16. Печ. л. 2,56.
Тираж 20 экз. Заказ № 16-166.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Тюменский государственный нефтегазовый университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.