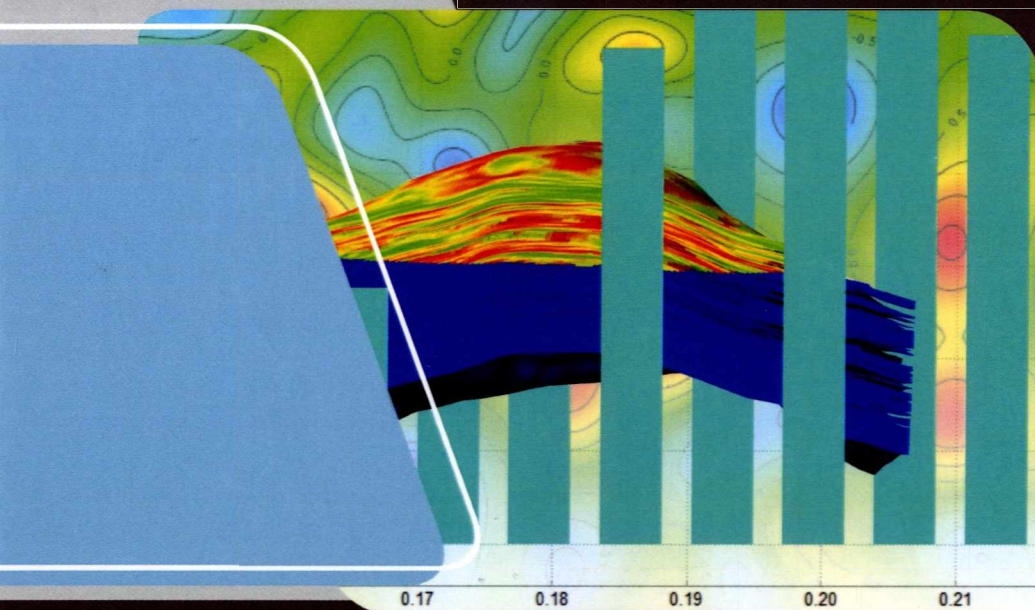


550
M 744

И «Инфра-Инженерия»



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Допущено Учебно-методическим объединением
вузов Российской Федерации по нефтегазовому образованию
в качестве учебника для студентов, магистров и аспирантов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
05.06.01 «Науки о Земле», 21.05.02 «Прикладная геология»,
21.04.01 «Нефтегазовое дело»,
21.05.03 «Технология геологической разведки»,
09.04.02 «Информационные системы и технологии»*

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 550.8 07
ББК 26.3
М74

Авторы:

Александров В. М., Белкина В. А., Санькова Н. В., Мазуркевич В. В.

Рецензенты:

кандидат педагогических наук, доцент *Г. В. Прозорова*;
доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник *А. А. Дорошенко*

М74 Моделирование геолого-геофизических параметров. Трехмерное моделирование : учебник / [Александров В. М. и др.]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 264 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2142-3

Приводится изложение основных методов трехмерного геологического моделирования, даны основные термины и определения, используемые в учебнике, с соответствующими пояснениями и примерами. Рассмотрены основные этапы создания трехмерных геологических моделей для разных ситуаций с различными наборами данных. Все геологические проблемы излагаются с одних позиций, приводятся примеры и иллюстрации к ним. Для лучшего понимания представленных в учебнике методических подходов приводятся конкретные примеры построения трехмерных геологических моделей по конкретным месторождениям.

Для студентов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям: 05.06.01 «Науки о Земле», 21.05.02 «Прикладная геология», 21.04.01 «Нефтегазовое дело», 21.05.03 «Технология геологической разведки», 09.04.02 «Информационные системы и технологии», а также инженерно-технических работников, желающих самостоятельно изучить основы обработки и интерпретации первичной геолого-геофизической информации, двухмерного и трехмерного моделирования.

554432

УДК 550.8.07
ББК 26.3



ISBN 978-5-9729-2142-3

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ЗАЛЕЖИ НЕФТИ И ГАЗА, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	12
1.1. Предварительные замечания	12
1.2. Фильтрационно-емкостные характеристики пород-коллекторов	13
1.3. Гидрофильные и гидрофобные породы-коллекторы	28
1.4. Капиллярное давление	33
1.5. Коэффициенты начальной нефтегазонасыщенности	39
Список использованной литературы	51
2. ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. ОБОСНОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ОБЪЕМНЫХ СЕТОК МОДЕЛИ	54
2.1. Предварительные замечания	54
2.2. Область моделирования	56
2.3. Определение горизонтального строения трехмерной сетки	59
2.4. Определение вертикального строения трехмерной сетки	65
2.5. Встраивание разломов в трехмерную сетку	71
Список использованной литературы	74
3. ПЕРЕМАСШТАБИРОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ ДАННЫХ НА ТРЕХМЕРНЫЙ КАРКАС МОДЕЛИ	75
3.1. Предварительные замечания	75
3.2. Интерполяция дискретных и непрерывных диаграмм	77
3.3. Оценка качества интерполяции скважинных данных на трехмерную сетку	79
Список использованной литературы	82
4. ПОСТРОЕНИЕ ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ	83
4.1. Предварительные замечания	83
4.2. Фациальный анализ. Задачи и методы	84
4.3. Литолого-фациальный анализ (по керну)	86
4.4. Фациальная характеристика отложений в разрезах скважин по данным ГИС	98
4.5. Фациальная характеристика отложений методами, основанными на физических свойствах горных пород (сейсморазведка)	107
4.6. Лабораторное моделирование геологических процессов	116
4.6.1. Физические модели тектонических явлений	118
4.6.2. Лабораторное моделирование процессов осадконакопления	128
4.6.3. Лабораторное моделирование теплового воздействия на продуктивные отложения	138
4.7. Создание литолого-фациальной модели	140
4.7.1. Подготовка и анализ исходных данных	141
4.7.2. Обоснование и вычисление трендов при создании ЛФМ	141
4.7.3. Анализ анизотропии распределения литофаций	147
4.7.4. Алгоритмы моделирования	148
Список использованной литературы	156

5. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ	159
5.1. Предварительные замечания	159
5.2. Создание трехмерной модели открытой пористости	159
5.3. Создание модели трещинной емкости	181
5.3.1. Методические подходы для оценки эффективной трещинной и трещинно-кавернозной емкости пород-коллекторов по данным ГИС	181
5.3.2. Методы моделирования трещиноватых пород-коллекторов	195
5.4. Создание модели коэффициента проницаемости	199
Список использованной литературы	202
6. МЕТОДЫ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕФТЕ-, ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ	205
6.1. Предварительные замечания	205
6.2. Обзор методов моделирования нефте-, газонасыщенности	206
6.3. Анализ качества исходных данных	223
6.4. Примеры построения моделей нефте-, газонасыщенности	225
6.4.1. Алгоритм построения трехмерной модели нефтенасыщенности с использованием классификации пород-коллекторов по пористости	226
6.4.2. Алгоритм построения трехмерной модели нефтенасыщенности с использованием значений капиллярного давления	228
Список использованной литературы	231
7. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	233
7.1. Общие подходы к оценке качества трехмерных геологических моделей	233
7.2. Примеры валидации геологических моделей	252
Список использованной литературы	255
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	257
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ	259

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

1D	одномерный
2D	двухмерный
3D	трехмерный
$d_{\text{скв}}$	диаметр скважины
$h_{\text{об}}$	общая толщина
$h_{\text{эф}}$	эффективная толщина
$h_{\text{эф}}^{\text{ГН}}$	эффективная начальная газонасыщенная толщина
$h_{\text{эф}}^{\text{НН}}$	эффективная начальная нефтенасыщенная толщина
$h_{\text{пз}}$	толщина переходной зоны
$k_{\text{в}}$	коэффициент водонасыщенности
$k_{\text{во}}$	коэффициент остаточной водонасыщенности
$k_{\text{г}}$	коэффициент газонасыщенности
$K_{\text{нг}}$	трехмерная модель коэффициента начальной газонасыщенности
$k_{\text{н}}$	коэффициент нефтенасыщенности
$K_{\text{нн}}$	трехмерная модель коэффициента начальной нефтенасыщенности
$k_{\text{нг}}$	коэффициент начальной газонасыщенности
$k_{\text{нн}}$	коэффициент начальной нефтенасыщенности
$k_{\text{о}}^{\text{НГ}}$	коэффициент остаточной нефтегазонасыщенности
$k_{\text{но}}$	коэффициент остаточной нефтенасыщенности
$k_{\text{п}}$	коэффициент пористости
$k_{\text{п}}^{\text{Д}}$	коэффициент динамической пористости
$k_{\text{песч}}$	коэффициент песчанности
$k_{\text{по}}$	коэффициент открытой пористости
$k_{\text{пр}}$	коэффициент проницаемости
$k_{\text{пр}}^{\text{Г}}$	относительная фазовая проницаемость по газу
$k_{\text{пр}}^{\text{В}}$	относительная фазовая проницаемость по воде
$k_{\text{п}}^{\text{МЖЗ}}$	коэффициент межзерновой (матричной) пористости
$k_{\text{п}}^{\text{ТР}}$	коэффициент трещинной емкости
$k_{\text{п}}^{\text{КАВ}}$	коэффициент кавернозной емкости
$k_{\text{пр}}^{\text{Н}}$	относительная фазовая проницаемость по нефти
$k_{\text{п}}^{\text{ЭФ}}$	коэффициент эффективной пористости
$k_{\text{рас}}$	коэффициент расчлененности

$k_{тр}$	коэффициент трещиноватости
MPS	метод многоточечной статистики
NTG	3D модель песчанистости
P_c	капиллярное давление
ρ_v	плотность воды
ρ_n	плотность нефти
$\delta_{тф}$	плотность твердой фазы
$\Delta t_{тф}$	время движения акустической волны по твердой фазе
r	коэффициент корреляции
R^2	коэффициент детерминации
Ом·м	единица измерения сопротивления
SIS	последовательное гауссово моделирование
TGS	усеченное гауссово моделирование
а. о.	абсолютная отметка
АВПД	аномально высокое пластовое давление
АГК	антиклинально-гравитационная концепция
КГК	капиллярно-гравитационная концепция
АК	акустический каротаж
БК	боковой каротаж
БЭЗ	боковое электрическое зондирование
ВГ	вариограмма
ВИК-ПБ	высокочастотный индукционный каротаж в процессе бурения
ВИКИЗ	высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование
ВНК	водонефтяной контакт
ВНЗ	водонефтяная зона
ГВЗ	газоводяная зона
ГВК	газоводяной контакт
ГГКп	гамма-гамма каротаж плотностной
ГДИС	гидродинамические исследования скважин
ГДМ	гидродинамическая модель
ГИС	геофизические исследования скважин
ГК	гамма-каротаж
ГМ	геологическая модель
ГНК	газонефтяной контакт
ГП	горная порода
ГРР	геологоразведочные работы
ГСР	геолого-статистический разрез

ГТМ	геолого-технологические мероприятия
ГТИ	геолого-технологические исследования
ДНМ	дискретно-непрерывные модели
ЗС	Западная Сибирь
ЗСНГП	Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция
ЗСНГБ	Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн
ИК	индукционный каротаж
КД	капиллярное давление
КИН	коэффициент извлечения нефти
ККД	кривая капиллярного давления
КС	кажущееся сопротивление
ЛФМ	литолого-фациальная модель
МБК	микробоковой каротаж
МНК	метод наименьших квадратов
МОВ	метод отраженных волн
МОГТ	метод общей глубинной точки
НГК	нейтронный гамма-каротаж
НКТ	нейтронный каротаж по тепловым нейтронам
ОВ	отраженная волна
ОГ	отражающий горизонт
ОГТ	общая глубинная точка
ОТКВ	фации основного тела конуса выноса
ОФП	относительная фазовая проницаемость
ПАВ	поверхностно-активные вещества
ПВНЗ	переходная водонефтяная зона
ПГВЗ	переходная газоводяная зона
ПЗКВ	фации периферийной зоны конуса выноса
ПЗ	переходная зона
ПО	программное обеспечение
ПС	метод потенциалов собственной поляризации
РИГИС	результаты интерпретации ГИС
РОП	фации русел обломочных потоков
РЭМ	растровая электронная микроскопия
СГК	спектральный гамма-каротаж
Скв	скважина
ТЕ	трещинная емкость
ТКЕ	трещинно-кавернозная емкость
УВ	углеводороды

УВС	углеводородное сырье
УПК	фация устья подводящего канала
УСВ	уровень свободной воды
УЭС	удельное электрическое сопротивление
ФЕС	фильтрационно-емкостные свойства
ФКД	диаграмма линий равных фаз
ЧГЗ	чисто газовая зона
ЧНЗ	чисто нефтяная зона
ЯНАО	Ямало-Ненецкий автономный округ

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние науки вообще и геологии, в частности, характеризуется переходом от изучения хорошо организованных систем к плохо организованным – диффузным системам, то есть к системам, описываемым несколькими десятками, а зачастую сотнями параметров, большинство из которых характеризуются разными законами изменчивости в разных частях изучаемых объектов. Со времен И. Ньютона и до начала 20-го века точные науки имели дело только с хорошо организованными системами, в которых можно было выделить явления или процессы одной физической природы, зависящие от небольшого числа переменных. Методы таких наук основывались, в основном, на классической математике. Результаты таких исследований представлялись хорошо интерпретируемыми функциональными связями, например, всем хорошо известные законы Ньютона, теории относительности и т. д.

В течение более чем 300 лет исследователи большей частью изучали одно-, двух- и трехфакторные явления. При этом исследователи вынуждены были стабилизировать все другие независимые переменные (факторы) изучаемой системы. Затем, поочередно варьируя некоторыми из них, можно было в некоторых случаях установить нужные зависимости.

Лишь в начале 20-го века появились первые работы по изучению плохо организованных – сложных диффузных систем, в которых нельзя четко выделить отдельные явления. Эти многофазные, многокомпонентные системы описываются, как правило, большим числом переменных. Например, в нефтегазовой геологии детальное описание залежей требует порядка 40 геолого-геофизических параметров, причем почти по всем параметрам изучаемые объекты неоднородные и нестационарные. Кроме того, при изучении объектов надо учитывать действие очень многих разнородных факторов, различных по своей природе, но тесно взаимодействующих друг с другом. Для примера назовем процессы осадконакопления (седиментации), литогенеза, тектогенеза, нефтегазообразования и др. Более того, изучаемые геологические объекты могут характеризоваться разными статистическими свойствами в разных частях.

В настоящее время в нефтегазовой геологии для изучения месторождений применяется несколько подходов: геологическое моделирование, статистический анализ, детерминированные методы интерполяции и аппроксимации и физическое моделирование. Между ними нет четкой границы, многие составляющие мультидисциплинарных моделей оцениваются и детерминированными и статистическими методами.

Последние 5–10 лет заметно растет число публикаций по созданию геологических моделей методами искусственного интеллекта или нейронных сетей. Широкое развитие получили методы анализа геологического строения объектов на основе многовариантных расчетов. При этом методы моделирова-

ния разной размерности являются главным инструментом изучения геологических объектов. В каждом из подходов в современном программном обеспечении заложен целый ряд методов.

Под геологической моделью понимается представление строения геологического объекта в цифровом виде: его геометрии, стратиграфии, литолого-фациальной характеристики пластов, изменения их эффективных и эффективных нефте-, газонасыщенных толщин, фильтрационно-емкостных свойств – пористости и проницаемости – по площади и разрезу, газо-, нефтенасыщенности отдельных пропластков, гидрогеологической характеристики, величине запасов нефти, конденсата и газа.

Построение и практическое использование моделей необходимо на всех стадиях изучения, начиная от процесса поиска и разведки нефтяных и газовых месторождений и заканчивая выработкой остаточных запасов. При этом модель выполняет функцию интеграции фактических данных, геологических и технологических знаний об объекте. Статические геологические модели месторождений являются основой решения практически всех геологических задач: подсчета запасов углеводородов, проектирования скважин и моделирования фильтрации флюидов в породах-коллекторах (гидродинамическая модель).

С другой стороны, в нефтегазовой геологии идет быстрый процесс накопления эмпирической информации и знаний: появляются новые методы измерений, резко растет объем данных. Геолог, занимающийся трехмерным моделированием, зачастую имеет дело с big data (большие данные).

Указанные факторы привели к заметному повышению детальности и точности описания многих сложных и очень сложных месторождений, а также более глубокому пониманию ряда геологических процессов: седиментационных, тектонических, нефтегазонакопления и др.

В такой ситуации построение геологических моделей и особенно трехмерных требует от специалиста глубокого понимания геологических процессов, особенностей строения изучаемых объектов, их генезиса, понимания возможностей и ограничений методов создания моделей и умения использовать в процессе моделирования различные виды геолого-геофизической, промысловой, геохимической информации и соответствующий набор знаний. Другими словами, значительно возросшая детальность геологических моделей и возможность использования больших данных резко повысили требования к уровню специалистов геологов-модельеров. Для подготовки таких специалистов в процессе обучения необходима глубокая проработка и методов создания моделей, методов анализа и входной информации, и результатов моделирования. Эффективная организация учебного процесса подготовки геологов-модельеров требует создания соответствующего уровня учебников и методических рекомендаций. К сожалению, создание учебников по трехмерному геологическому моделированию заметно отстает от потребностей учебного процесса.

Участие авторов в подготовке большого числа инженеров-геологов и кандидатов наук в Тюменском индустриальном университете, а также в многолетних исследованиях по изучению особенностей геологического строения месторождений в различных осадочных бассейнах Российской Федерации позволило систематизировать обширный первичный геолого-геофизический материал, использовать накопленный опыт для подбора конкретных параметров моделирования залежей УВ и для описания современных методик трехмерного моделирования в максимально доступной форме.

Освоение изложенных в учебнике методов анализа исходных данных, построенных моделей и методик моделирования невозможно без внимательного и глубокого ее изучения. Авторы надеются, что предлагаемый учебник поможет обучающимся овладеть современными методами создания геологических моделей и анализа их адекватности и точности. Авторы также выражают признательность всем читателям за полезные критические замечания и советы.