

УДК 550.8.072

## Концепция модуля геологического моделирования ArtGeo



**В.В. Шелепов**

/МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва/



**Д.В. Булыгин**

/ООО «Актуальные технологии», г. Казань/



**Р.Г. Рамазанов**

/ООО «Нефтегазовый НИЦ МГУ им. М.В. Ломоносова», г. Москва/

Поднята проблема, возникающая при использовании программных продуктов для построения геологических моделей, которые предназначены для подсчета запасов и проектирования разработки месторождений нефти и газа, а именно отсутствие системных знаний в области геологии у специалистов, занимающихся моделированием. Представлена новая отечественная программа ArtGeo, научно-методической основой которой служит блок трехмерного геологического моделирования, включающий элементы секвентной стратиграфии, что позволяет повысить детальность описания геометрии и структуры осадочных тел с горизонтальным и наклонным залеганием и получить доказательную базу на основе автоматизированной корреляции и фациального анализа.

**Ключевые слова:** геологическое моделирование, проектирование разработки месторождений нефти и газа, проектирование методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП), геолого-гидродинамические модели для ПНП, траектория бурения второго ствола, структурное и параметрическое моделирование, построение модели насыщения, программный продукт DV-Geo, метод детальной корреляции, фациальный анализ, секвентная стратиграфия, 3D-модели, программа ArtGeo, послонная автокорреляция, геологические тела (парасеквенсы), геолого-статистические разрезы (ГСР), циклостратиграфический анализ, построение 3D-палеомодели, метод самопроизвольной поляризации (ПС), построение фациальной модели, литотипы, петрофизические зависимости ядра.

**В** нефтепромысловой практике повсеместно используются пакеты геологического моделирования ведущих мировых производителей Petrel (Schlumberger) и IRAP RMS (Roxar). Их назначение – создание полномасштабных геологических моделей для подсчета запасов и проектирования разработки месторождений нефти и газа [1]. В настоящее время процесс создания геологических моделей перестал быть чем-то уникальным. Практически для каждого разрабатываемого месторождения построены геологические модели. Несмотря на широкое использование сверхмелких сеток, происходит потеря макро- и микро-неоднородности реальных объек-

тов исследования и сглаживание важнейших параметров, влияющих на движение нефти в пласте. Модели, созданные с помощью указанных программных продуктов, характеризуются значительным упрощением геологического строения пластов и неоправданным осреднением параметров при гидродинамическом апскейлинге [2]. Повсеместная математизация снизила роль собственно геологических наблюдений в решении актуальных практических задач. Побочной стороной широкого внедрения в нефтепромысловую практику методов моделирования стало формальное отношение специалистов к объекту исследования. Лучшими модельерами оказались ма-

тематики, которые в совершенстве владеют стандартными инструментами и технологиями моделирования, предлагаемыми конкретными программными продуктами, но не обладают системными знаниями в области геологии.

**1. Геологическая постановка задачи.** Среди специалистов, занимающихся разработкой месторождений, находящихся на поздней стадии и разбуренных плотной сеткой скважин, неуклонно возрастает интерес к решению локальных задач, связанных с подбором участков и проектированием методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП). Поэтому требуется более высокая детальность описания геологического строения объектов. Сильно генерализованные геолого-гидродинамические модели для целей ПНП не подходят. Возрастает цена ошибки при выборе траектории бурения второго ствола с горизонтальным окончанием или ввода скважины из длительного бездействия. Требуется разработка новых методик моделирования, алгоритмов и программных средств, пригодных для создания локальных моделей по небольшим участкам, при этом согласованных с геологическим строением месторождения в целом.

Как следует из [3], основными задачами являются структурное, параметрическое моделирование и построение модели насыщения. Считается, что этих материалов вполне достаточно [4], что видно на примере такого известного отечественного программного продукта, как DV-Geo. Такой подход отчасти продиктован требованиями ЦКЗ преимущественного использования классических приемов геологического изучения месторождений, принятых в нефтепромысловой геологии.

**2. К вопросу выбора метода детальной корреляции.** Геологическое строение объекта, подлежащего изучению, определяет выбор метода исследования. Так, аллювиально-дельтовое строение, присущее большинству природных резерву-

аров неокома Западной Сибири, определяет методику выделения геологических тел в пространстве, а также их взаимодействие между собой (т.е. корреляцию).

Принципы детальной корреляции (2D) [5]:

- Параллельность напластования отдельных слоев по отношению к реперному горизонту.

- Преимущественное использование прослоев глин как наиболее устойчивых на значительных расстояниях пачек.

- Учет ритмичности в чередовании песчаных и глинистых слоев.

- Корреляция пластов в пределах групп скважин, имеющих различия (в 1-2 м) в толщинах пластов.

- Раздельная корреляция пластов в областях палеорусел и межрусловых зонах.

- Широкое использование при корреляции не только каротажных диаграмм, но и вещественного состава пород, определенного на основе детальных микроскопических исследований.

Недостатки корреляции проявляются в плохой прогнозируемости разрезов по вновь буримым скважинам. Всем известны случаи, когда корреляция вдоль длинной оси структуры дает один результат, а вкрест простирания – совершенно иной. Следует учесть, что приведенные рекомендации родились еще в докомпьютерную эру, когда секвенс-стратиграфии в современном ее понимании [6, 7] попросту не существовало.

Сформулируем новые возможности, которые предоставляет исследователю технология построения геологической модели на основе принципов хроно- и литокорреляции:

- Автоматизированная корреляция наклонных или горизонтальных тел в 3D-палережиме по всему профилю седиментации, а не только по литологическому признаку «коллектор-неколлектор», «пропласток-перемычка».

- Учет различия строения пластов (макроанизотропии) вдоль и

вкрест простирания отложений, т.е. относительно положения древней береговой линии.

- Учет геометрии секвенсов в виде замкнутых обособленных тел, напоминающих по форме чечевицу, а для более мелких тел, «парасеквенсов», – линзу.

- Обеспечение непрерывных (а не ступенчатых) границ геологических тел в межскважинном пространстве, что особенно важно для устойчивой работы программ гидродинамического моделирования.

- Одновременное прослеживание вертикальных и латеральных литологических границ и резкостных контактов, позволяющее достичь полного согласования результатов корреляции и фациального анализа.

- Возможность решения сложной прикладной задачи – проведение апскейлинга по геологическим телам.

Основная идея секвентной стратиграфии состоит в том, что в условиях аллювиально-дельтового и прибрежно-морского осадконакопления одновозрастные проницаемые пласты могут коррелироваться только вдоль простирания отложений. Вкрест простирания отложений одновременно откладываются песчаники и глины различного генезиса. Проницаемые прослои выглядят укороченными по сравнению с первым вариантом. При построении разреза под углом к простиранию одновозрастные проницаемые пласты могут залегать наклонно.

Результаты корреляции позволяют уточнить фациальная модель путем прослеживания закономерностей перехода одного фациального типа в другой по площади и разрезу пласта.

**3. Технология моделирования в ArtGeo.** Группой специалистов была создана новая отечественная программа – ArtGeo [8]. Научно-методической основой ArtGeo служит блок трехмерного геологического моделирования, включающий элементы секвентной стратиграфии, что позволяет повысить деталь-



Рис. 1. Технология построения геологической модели в ArtGeo

ность описания геометрии и структуры осадочных тел с горизонтальным и наклонным залеганием и получить доказательную базу на основе автоматизированной корреляции и фациального анализа.

На рис. 1 показан полный цикл построения геологической модели, реализованный в ArtGeo.

Основным отличием технологии моделирования является работа в цикле, благодаря чему достигается переход от более грубой «первичной» структурно-параметрической модели через секвентно-стратиграфический анализ к более точной «детальной» модели.

На первом этапе осуществляется выбор методики моделирования и построение принципиальной модели, включая определение количества ритмов, выявление наличия (отсутствия) наклона слоев, учет выхода отдельных геологических тел на кровлю пласта, учет общего или различных ВНК (ГНК) по залежам и определение моделируемого типа залежи нефти. При построении «первичной» модели учитывается только часть операций, составляющих полный цикл геологического моделирования. В результате реализации «нулевого цикла» получаем первичную геологическую модель, построенную на равномерной сетке corner point, с выделением геологических тел (секвент-пропластков).

ArtGeo спроектирована в соответствии с решаемыми задачами в области геологического моделирования по методам «секвентной стратиграфии». Помимо визуализации результатов расчетов ArtGeo служит для интерактивного взаимодействия с базой данных, построения модели и корректировки исходной информации.

Кроме этого блок включает процедуру подготовки основы для гидродинамических расчетов в формате данных Tempest (Roxar) и формате, принятом для расчетов эффективности ГТМ по трубкам тока (TubeGeo) [9].

Алгоритмы построения геологических моделей в ArtGeo формализованы с применением известных технологий, используемых в обработке космических и аэроснимков, и модификаций широко применяемых в нефтяной геологии методов исследований [10], переработанных для целей 3D-моделирования.

На примере одного из месторождений Западной Сибири рассмотрим приемы построения (п. 4-10), принятые в технологии секвентного моделирования, с использованием программы геологического моделирования ArtGeo.

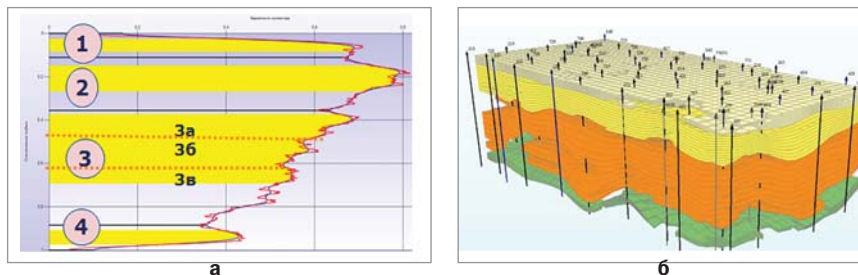
**4. Послойная автокорреляция.** Служит для подготовки стратиграфической основы 3D-моделирования. На этом этапе выявляются грубые ошибки в первичных данных, осуществляется их редактирование. Для выделения границ геологических тел (парасеквенсов) используются ГСР. Вся работа ведется только на основе загруженных данных. 3D-модель отсутствует. На этой стадии производится уточнение нижней границы (подшвы) секвенса, соответствующей, как правило, поверхности размыва и началу регрессивного цикла осадконакопления. Под секвенсом понимается относительно согласная последовательность генетически связанных слоев, ограниченная несогласиями и коррелятивными им согласными поверхностями, сформированная за один цикл колебания уровня моря [5, 6]. В недобуренных скважинах осуществляется восстановление подошвы. В качестве верхней границы секвенса принимается поверхность максимального затопления либо другая геологическая поверхность, например кровля пласта, залегающая согласно с ней. Собственно процедура автокорреляции заключается в запуске программы автокорреляции с целью определения контрольных точек-индексов (изокоррелят). Задача корреляции разрезов скважин состоит в отыскании монотонной функции, определяющей однозначное соответствие между абсолютными отметками на скважинах. Построение отбивок в скважинах осуществляется с использованием так называемого «коррелятора», использующего модифицированный алгоритм Semi-Global Matching (SGM), разработанный для распознавания снимков. При корреляции разновозрастных отложений применяется выбранный тип модели слоеобразования (плоско-параллельный, клиноформенный, циклический, линзовидный и т.д.). В качестве входных данных могут использоваться проницаемые интервалы по скважинам, а также один или несколько видов каротажных кривых. Программа автокорреляции весьма чувствительна к исходным данным по кровле и подошве пласта. Поэтому ее работу дополняют традиционные инструменты моделирования, такие как гистограммы и кросс-плоты, служащие для анализа общих и эффективных толщин, отметок кровли и подошвы и других параметров по объекту в целом и отдельным участкам.

**5. Циклостратиграфический анализ** служит для расчета количества и границ пачек в среднем по пласту,

участку и каждой скважине в отдельности на основе алгоритма построения локальных геолого-статистических разрезов (ГСР), отражающих вероятность встречи коллектора в палеорежиме и программы автокорреляции. Последовательность и номера циклов соответствуют полному циклу формирования парасеквенсов. На **рис. 2** показан пример выделения четырех циклов осадконакопления по ГСР.

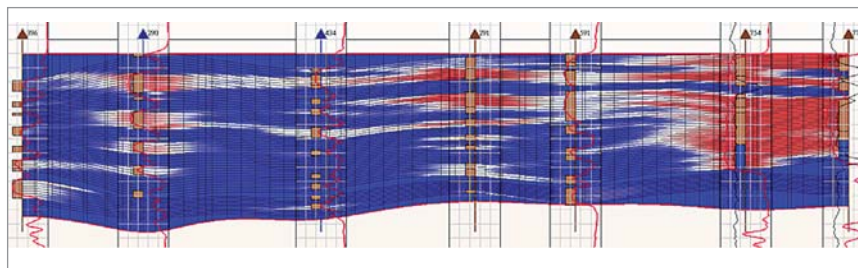
Из них 1-й, 2-й и 4-й циклы имеют толщину в пределах 2-4 м. Несмотря на то, что циклы достаточно мелкие, они характеризуются высокой устойчивостью по простиранию. Третий, более грубый цикл имеет среднюю толщину 15 м, поэтому в ArtGeo предлагается инструмент, позволяющий дополнительно осуществлять управление количеством выделенных ритмов и разбивку крупных циклов на более мелкие ритмы путем построения локальных ГСР. Предоставлена возможность учета характерных типов ГСР, которые имеют дифференциацию разреза на пропластки. Имеется возможность исключения из расчетов неинформативных скважин. Окончательное решение о количестве циклов и синхронизации их границ в модели принимается путем анализа всей совокупности информации по палеомодели.

**6. Построение 3D-палеомодели.** Восстановление значений в межскважинных интервалах по нерегулярно распределенным данным осуществляется в палеорежиме с использованием алгоритма трехмерной интерполяции многоуровневыми В-сплайнами. В качестве входных данных используются результаты предшествующей работы программ – границы циклов, определенных с помощью ГСР с учетом предварительной работы программы автокорреляции. В качестве одной из разновидностей палеомодели может рассматриваться так называемая модель осадконакопления, которая служит для установления направления движения древней берего-

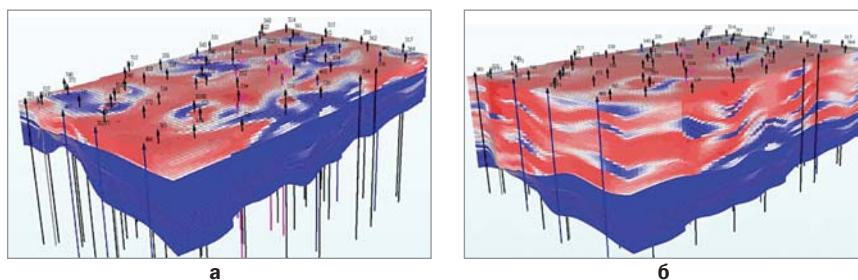


**Рис. 2. Пример выделения количества циклов:**

*а – с помощью ГСР и программы автокорреляции; б – конечный результат в виде 3D-палеомодели*



**Рис. 3. Палеотектонический профиль глинистости, построенный по кубу аПС**



**Рис. 4. Модель осадконакопления в виде куба относительной глинистости:**

*а – стадия зарождения; б – стадия развития барового тела*

вой линии и областей максимального накопления осадков. На ее основе осуществляется проверка и корректировка геологической модели в палеорежиме.

Известно, что, используя метод самопроизвольной поляризации (ПС), можно получить информацию о гранулометрическом составе пород и глинистости разреза [10]. Относительная амплитуда кривой аПС тесно связана положительной корреляционной связью с содержанием песчаной фракции, пористостью и проницаемостью и отрицательно коррелирована с глинистой фракцией, что очень важно для проведения фациального анализа.

На палеотектоническом профиле (**рис. 3**), полученном как срез 3D-модели осадконакопления, приведен пример смены глубоководных гли-

нистых отложений мелководными отложениями баровых песчаников.

Изменение условий осадконакопления для нижнего ритма с трансгрессивных на регрессивные связана с уменьшением глубины палеобассейна. Согласно модели осадконакопления, представленной в виде куба относительной глинистости, можно проследить стадии зарождения (а) и развития (б) регрессивного цикла южного вдольберегового бара, как это показано на **рис. 4**.

Эта область характеризуется низкой относительной глинистостью ( $\alpha PS$ ). Зоны глинизации, связанные, по-видимому, с периодом стабилизации уровня моря, носят локальный характер. Формирование отложений вдоль берегового бара связано с крупным регрессив-

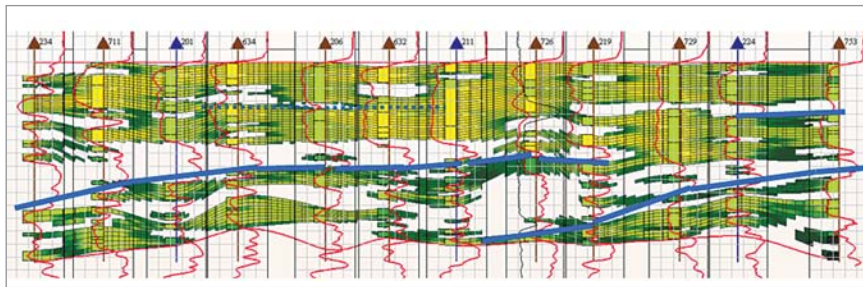


Рис. 5. Палеотектонический профиль, построенный с учетом двух циклов осадконакопления

ным циклом осадконакопления 3-го порядка, включающим более мелкие ритмы 2-го и 3-го порядков.

**7. Выделение геологических тел.**

На рис. 5 представлен палеотектонический профиль, построенный с учетом двух циклов к моменту завершения трансгрессивного цикла осадконакопления. В строении пласта прослеживается наклон слоев нижней пачки в направлении падения пласта, совпадающем с простираем древней береговой линии. Глинистые отложения между парасеквенсами, по-видимому, накапливались в период трансгрессии либо в период стабилизации уровня моря. Для мелководных участков бассейна седиментации отмечается увеличение толщины песчаных пластов.

Структурирование по геологическим телам – это отдельный этап, который заключается в выделении секвенс-пачек с помощью графического интерфейса на основе ранее проведенных расчетов.

**8. Построение фациальной модели.**

Методика компьютерного фациального анализа в ArtGeo основана на выделении литотипов по керну и распределении литотипов в 3D-пространстве с учетом формы геологических тел. Установление количества и положения границ фаций по заданным свойствам ячеек трехмерного куба в пределах выделенных геологических тел (парасеквенсов) осуществляется с помощью алгоритма построения куба фаций и алгоритма ISODATA. На рис. 6 показан пример карты фациальной зональности, построенной с использованием ячеек 3D-куба фаций, собранных в пределах 3-го парасеквенса. При отображении интегральных карт по отдельным парасеквенсам часто образуются мелкие включения одной области в другую, которые не связаны с геологией, а находятся за пределами точности вычислений по данному алгоритму.

Для окончательного оформления карты предусмотрена различная степень генерализации зон. С целью выделения важнейшего параметра для построения фациальной модели, например глинистости (в нашем случае это аПС), предусмотрено управление весами отдельных параметров.

Область контакта разнофациальных отложений удобно определять по картам эффективных толщин, собранным по слоям модели с вынесенными на них миникаротажными диаграммами. Так, баровые отложения характеризуются высокими значениями  $\alpha PS$ , четким регрессивным ритмом осадконакопления и значительной эффективной толщиной, характеризующей высокий энергетический режим обстановки осадконакопления. Отложения более глубоководной части бассейна седиментации – преимущественно глинистые. Границы между зонами могут быть зафиксированы по наличию областей потери корреляции, которые хорошо передают энергетический режим обстановки осадконакопления.

**9. Учет литотипов и петрофизических зависимостей.**

Литотипы могут также использоваться в качестве самостоятельного инструмента для каждой выделенной фациальной зоны. Построение петрофизических зависимостей по

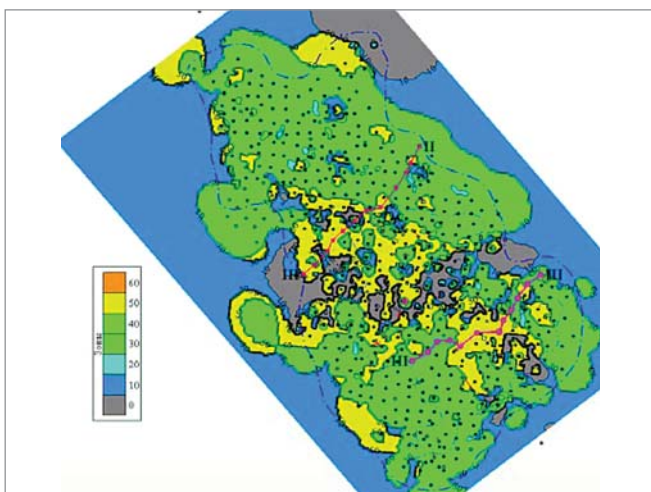


Рис. 6. Пример карты фациальной зональности в пределах 3-го парасеквенса

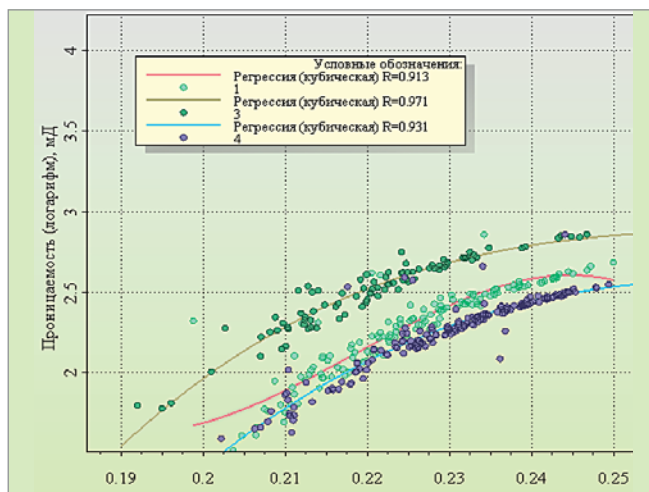


Рис. 7. Зависимость логарифма проницаемости от пористости для различных фациальных типов пласта

казывает существенное различие условий осадконакопления, что является еще одним инструментом для проверки правильности определения фациальной зональности пласта (рис. 7).

Кроме того, петрофизические зависимости значений связанной воды, коэффициентов пористости и проницаемости от  $\alpha$ ПС и других показателей используются для восстановления отсутствующих па-

раметров с учетом фациальной зональности.

### Выводы

1. Концепция комплекса геологического моделирования ArtGeo позволяет повысить детальность и информативность построения геологических моделей путем учета основных понятий секвентной стратиграфии и согласования ее с генетическими и палеотектоническими

асpekтами образования сложнопостроенных геологических объектов.

2. Практическая реализация концепции в виде технологии моделирования заключается в организации работ в цикле, благодаря чему достигается переход от более грубой «первичной» структурно-параметрической модели через отдельные стадии секвентно-стратиграфического анализа к «детальной» геологической модели.

### Литература

1. РД 153-39.0-047-00. Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. – М.: Минтопэнерго РФ, 2000. – 129 с.
2. Халимов Э.М. Детальные геологические модели и трехмерное моделирование // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 3. – С. 1-10.
3. Закревский К.Е. Геологическое 3D-моделирование. – М.: Маска, 2009. – 376 с.
4. Крестелев А.И. Геологическое моделирование в пакете DV-Geo. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 80 с.
5. Справочник по нефтепромысловой геологии / Н.Е. Быков, А.Я. Фурсов, М.И. Максимов и др. – М.: Недра, 1981. – 525 с.
6. Габдуллин Р.Р., Копаевич Л.Ф., Иванов А.В. Секвентная стратиграфия: учеб. пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 113 с.
7. Позаментьер Г., Аллен Дж. П. Секвенная стратиграфия терригенных отложений. Основные принципы и применение. – Ижевск, 2014. – 436 с.
8. Свидетельство о регистрации № 2015662865. ArtGeo, версия 1.0. Программа трехмерного геологического моделирования / В.В. Шелепов, Д.В. Булыгин, В.Г. Насибулин, А.А. Савельев, Р.Г. Рамазанов. – 2015.
9. Свидетельство о регистрации № 2016611381. TubeGeo, версия 1.0. Моделирование геолого-технических мероприятий методом трубок тока / В.В. Шелепов, Д.В. Булыгин, А.Б. Мазо, К.А. Поташев, Р.Г. Рамазанов. – 2015.
10. Бадьянов В.А. Методы компьютерного моделирования в задачах нефтепромысловой геологии. – Шадринск: ОГУП «Шадринский дом печати», 2011. – 184 с.
11. Булыгин Д.В., Ганиев Р.Р. Геологические основы компьютерного моделирования нефтяных месторождений – Казань: Казан. гос. ун-т, 2011. – 368 с.