

УДК 553.984

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА

Закревский Константин Евгеньевич¹,
Geo-Model@yandex.ru

Попов Виктор Львович²,
vlp14788@gmail.com

¹ ПАО «НК «Роснефть»,
Россия, 117997, г. Москва, Софийская набережная, 26/1.

² АО «ТомскНИПИнефть»,
Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72.

Актуальность исследования обусловлена широким применением геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа. В настоящее время согласно методическим указаниям все проектные документы на разработку нефтегазовых месторождений должны выполняться на трехмерных геолого-технологических моделях.

Цель: определить основные этапы развития метода геологического моделирования и рассмотреть основные программные пакеты для геологического моделирования с целью установления их основных преимуществ и недостатков.

Объекты: геологическое моделирование как метод изучения месторождений в нефтегазовой геологии.

Методы: компиляция опубликованной литературы и интернет источников по теме истории методов геологического моделирования и программных пакетов геологического моделирования.

Результаты. Определены, впервые скомпилированы в единую работу и описаны основные этапы развития геологического моделирования как метода исследования нефтегазовой геологии. Первый этап в становлении геологического моделирования – заложение предпосылок его возникновения, которые заключались в осознании необходимости использования математического аппарата для описания природных геологических систем. Следующий этап, в ходе которого появилась новая наука – математическая геология – и её отрасль, называемая геостатистикой, пришелся на 1950–1970-е гг. К концу 1970-х гг. геостатистика добилась значительных успехов и был разработан математический аппарат для анализа и моделирования свойств в двумерном представлении. В 1980-х гг. появилось собственно трехмерное геологическое моделирование и активно развивались методы построения моделей и их использования для решения производственных задач. Основные исследовательские работы, касающиеся геологического моделирования, в этот период проводились в трех центрах геостатистики – в Стенфордском университете, в Парижском институте нефти и в Норвегии, в компании «NorskHydro». Следующим этапом можно назвать появление и внедрение в массовое использование коммерческих пакетов для трехмерного моделирования, таких как «Irap RMS», «Petrel», «Stratamodel» и многих других. Этот этап охватывает 1990-е и 2000-е гг. К его окончанию были разработаны большинство современных методов геологического моделирования и заложен тренд на интеграцию в геомодели результатов гидродинамических, сейсмических, геомеханических, тектонических и др. методов изучения нефтегазовых пластов, флюидов и разработки месторождений. С 2018 г. в ПАО «НК «Роснефть» ведется разработка корпоративного пакета для геологического моделирования «РН-Геосим», в этом пакете учтены все преимущества других пакетов и последние тенденции в области геологического моделирования.

Ключевые слова:

Методы нефтегазовой геологии, геологическое моделирование, пакеты геологического моделирования, история геологического моделирования, РН-Геосим.

Введение

В геологии нефти и газа в последние десятилетия геологическое моделирование стало одним из главных методов изучения месторождений. Если обратиться к статистике использования ключевых слов в статьях, опубликованных на портале общества инженеров нефтяников SPE [1], то в начале 1980-х гг. словосочетание «geological modeling» (геологическое моделирование) встречалось примерно в 50 % работ по геологии нефти и газа, к 2000 г. это число выросло примерно до 80 %, а с 2015 г. оно превышает 100 % (рис. 1). Таким образом, в настоящее время не только все работы по геологии нефтегазовых месторождений так или иначе затрагивают вопросы геологического моделирования, но есть опубликованные работы, которые рассматривают геологические модели в отрыве от геологии как таковой, например, касающиеся гео-

логически обоснованной адаптации динамических моделей. Следует отметить, что на портале OnePetro [1] собраны статьи, в первую очередь касающиеся вопросов геологии и разработки месторождений и в меньшей степени – вопросов поисков месторождений и анализа неопределенностей и рисков при оценке районов поисковых работ, и в настоящее время геологические модели все активнее используются на всех этапах разведки и эксплуатации месторождений [2–6].

Современные трехмерные геологические модели нефтегазовых месторождений представляют собой детальные трехмерные двойники месторождений, которые включают в себя результаты комплексных исследований всех геологических аспектов месторождений: данные геофизических исследований скважин; данные о геологии и седиментологии отложений, сла-

гающих залежь; данные палеонтологических, минералогических, литологических исследований каменного материала; результаты интерпретации данных сейсморазведки; в том числе и аналогов, и многие другие. Тем не менее первые численные геологические модели выдающегося советского геолога А.Б.

Вистелиуса, построенные в 1948–1949 гг. [7, 8], были одномерными и при помощи цепей Маркова воспроизводили только ритмичный характер литологии осадочных толщ. С тех пор геологическое моделирование прошло несколько этапов, которые рассмотрены в дальнейших разделах.

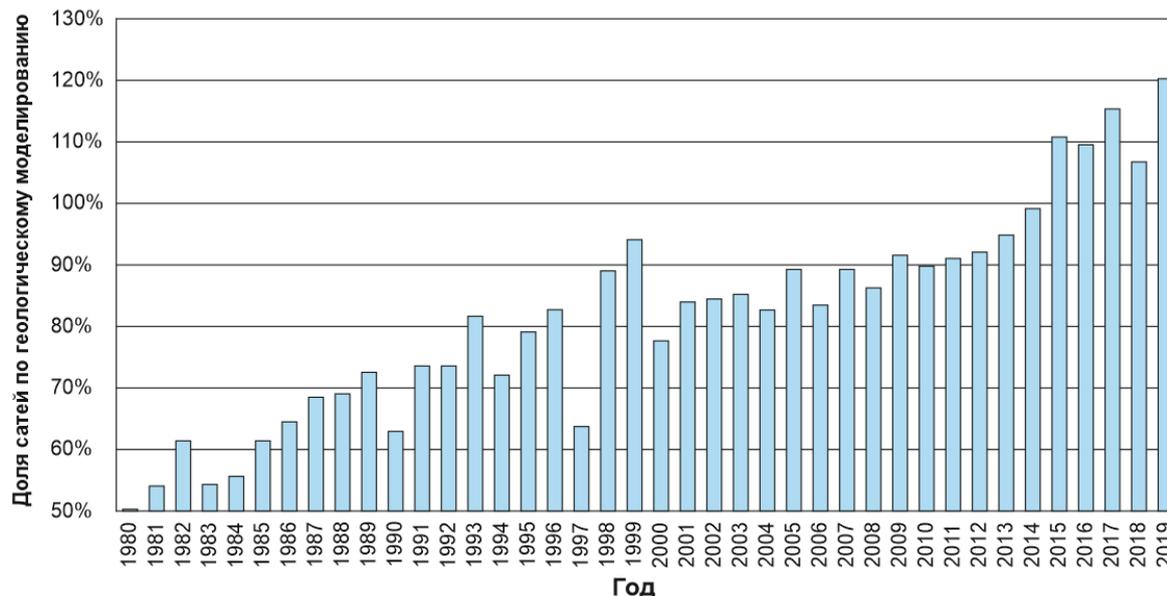


Рис. 1. Доля встречаемости словосочетания «geological model» в статьях по геологии нефти и газа на портале общества инженеров нефтяников [1]

Fig. 1. Fraction of papers containing word combination «geological modeling» of total geology papers on web portal of Society of Petroleum Engineers [1]

Формирование основ геологического моделирования (до 1980-х гг.)

Г.В. Лейбниц в 1680 г. предложил теорию образования Земли из огненно-жидкого изначального состояния. В последующие 100 лет эта теория активно развивалась в работах множества ученых, что стало свидетельством появления геологии как самостоятельной науки. Долгое время развитие научной геологии проходило только в рамках описательной парадигмы в силу ограничений, накладываемых религиозными догматами на интерпретацию результатов непосредственных наблюдений. Описательная парадигма господствовала в науках о земле до конца XIX в. и во многих отношениях сохранила свое влияние и в настоящее время.

Накопление значительного количества описаний геологических объектов и необходимость их систематизации и интерпретации привели к переходу к дедуктивной геологической парадигме. Как следствие – для полноты понимания геологических процессов и объектов возникла необходимость обращения к достижениям физики, химии, термодинамики, математики и других точных наук. На рубеже XIX–XX вв. в сфере внимания исследователей оказалось много геологических проблем, которые имели генетический характер: происхождение эрратических валунов, латеральная аккреция, ликвационное образование горных пород, происхождение нефти и др. [9], что и привело к постепенному вытеснению описательной пара-

дигмы из наук о земле. В это время целью геологии, равно как и других наук, становится, в соответствии со взглядом концепцией Де Бюффона [10], описание объекта, объяснение его происхождения и изучение истории развития.

С начала XX в. наблюдается интеграция знаний, технологий и методов точных наук в геологические дисциплины. По-видимому, одним из первых геологов, которые подняли вопрос важности количественного учета геологических признаков, был Э. Рейер [11]. Позднее эти идеи развивались в работах А. Харкера [12], Дж. Ричардсона [13], Ф.Ю. Левинсона-Лессинга [14] и У. Крамбейна [15]. Таким образом, в начале 1940-х гг. возникла необходимость в появлении науки, которая при помощи математических методов будет описывать природные геологические системы [9].

Основоположником новой отрасли наук о земле, названной математической геологией, можно назвать выдающегося советского геолога XX в. Андрея Борисовича Вистелиуса [16, 17]. В его работах конца 1940-х гг. сформулированы основные проблемы, решением которых эта новая наука и призвана заниматься. В 1948–1949 гг. были опубликованы работы А.Б. Вистелиуса [8, 16], в которых на основе цепей Маркова решались вопросы одномерного моделирования процессов осадконакопления и обработки данных литологии. Эти работы можно назвать первыми математическими геологическими моделями, поло-

жившими начало использованию геологических моделей для описания природных объектов [17].

Вслед за этим началось интенсивное развитие точных методов в геологии. Так, в 1960-х гг. сформировался особый раздел математической геологии, называемый геостатистикой, который занимается изучением взаимоотношения случайных величин в пространстве и проблемой их интерполяции, экстраполяции и анализа. В 1962 г. вышла в свет книга Ж. Матерона «Основы прикладной геостатистики» [18], заложившая основы геостатистики как самостоятельной научной отрасли. В 1968 г. книга была издана на русском языке. Предложенный Ж. Матероном способ описания пространственной изменчивости случайных величин посредством вариограмм стал основой всех распространенных методов линейной геостатистики. Эта базовая система уравнений пространственной регрессии с ковариационной функцией была названа «кригингом» в честь геолога Д.Г. Криге, служившего инженером на золоторудном месторождении Витвотерсранд и решавшего задачи подсчета запасов [19].

В 60–70-х гг. XX в. развитие геостатистики было сосредоточено в двух научных центрах – в Стенфордском университете и в центре геостатистики в Париже. В 1970-е гг. силами таких исследователей, как А. Журнела, Ч. Хужбрегтс, П. Делфинер, Ж. Чилеса и некоторых других, были разработаны новые методы нелинейной геостатистики, и развитие науки продолжилось [20]. Однако, как отмечает сам Ж. Матерон, в те годы были существенные проблемы, которые мешали развитию геологического моделирования и его внедрению в исследование реальных геологических объектов [21]. Одна из главных трудностей заключалась в слабом междисциплинарном взаимодействии геологов и математиков, что существенно замедляло развитие геостатистики. Так, математики, располагая всем необходимым исследовательским инструментарием (случайной функцией и пр.), предпочитали избегать его применения к реальным геологическим объектам. Сложность и неоднородность реальных природных объектов не позволяла понимать их природу без специальных знаний геологии и смежных дисциплин. В свою очередь, геологи, понимающие строение залежей полезных ископаемых и проблемы, связанные с их изучением, находили абстрактные статистические модели избыточно сложными для понимания. Такого рода препятствия для развития геологического моделирования и геостатистики были в конце концов преодолены при помощи развития вычислительной техники и программных пакетов, которые производили сложные математические расчеты и позволяли геологам их использовать. При этом применение аппарата геостатистики дополнялось интуитивным пониманием строения и свойств природных объектов [21].

К концу 1970-х гг. геостатистика достигла существенных успехов в применении для двумерного моделирования и картирования свойств в залежах, и в последней четверти XX в. достижения этой науки успешно применялись в нефтяной геологии [22]. Од-

ним из главных методов интерполяции пространственных данных стал кригинг и его производные.

Появление трехмерного геологического моделирования и его внедрение в нефтегазовую геологию (1980-е и ранние 1990-е гг.)

Событием, ознаменовавшим начало следующего этапа развития геологического моделирования, можно назвать появление работы Е. Делхоме и Д. Гианессини [23] по исследованию месторождения Hassi-Messaoud в Алжире. В этой работе представлены результаты исследования, названного авторами «описанием глубинной структуры коллекторов» («in depth description of the sandstone reservoir anatomy»), но, по сути, являвшегося первым описанным в науке опытом пространственного геологического моделирования [22].

На основе описания взаимоотношений и характеристик пород была создана концепция индивидуализированных седиментологических единиц, которая и была положена в основу модели. Авторы выделили три главных литотипа: коллектор хорошего качества, слагающий песчаные тела, которые находились в объеме коллектора худшего качества, представленного более мелкозернистыми песчаниками, они были объединены для целей моделирования. Толща коллекторов вмещала в себя глинистые пропластки, которые имели прерывистый характер (рис. 2). Результаты исследований были объединены в компьютерной геологической модели, которая представляла собой набор вертикальных сечений пласта с распределенными в нём вышеуказанными литотипами. Основой для модели послужили интерпретация параметров глинистых пропластков по результатам геофизических исследований скважин и результаты изучения геологических разрезов, выходящих на поверхность. При помощи построенной геологической модели проводилось изучение характера заводнения залежей, влияния геологических параметров на поведение пластового давления и появления зон выделения свободного газа.

Эта работа вызвала интерес у многих исследователей, и, как следствие, в начале 1980-х гг. сформировались три главных научных центра геомоделирования [24]: Стенфордский центр прогноза месторождений SCRF (Stanford center for reservoir forecasting), который был основан под руководством А. Журнела и К. Дойча, Центр геостатистики во Французском институте нефти (IFP) и Центр геологического моделирования под руководством Х. Халдорсена и Х. Омре в норвежской компании NorskHydro.

Дальнейшая история геологического моделирования тесно связана с развитием программных пакетов для построения 3D моделей. Наиболее значимые из этих пакетов рассмотрены далее (пакеты для 2D моделирования в данной статье не рассматривались).

С начала 1980-х гг. во французском институте нефти разрабатывались программные пакеты «BluePack 3D» и «HereSim 3D», предназначенные для геологического моделирования и решения прикладных задач нефтяной геологии. «BluePack 3D» – это программа, разработанная как интерактивный пакет,

предназначенный для работы с данными большого объема (например, сейсмическими профилями) и для проведения геостатистического анализа этих данных [25, 26]. Непосредственно для создания моделей

предназначался пакет «HereSim 3D», в котором была возможность литофициального и петрофизического моделирования и встроенный гидродинамический симулятор (рис. 3) [27].

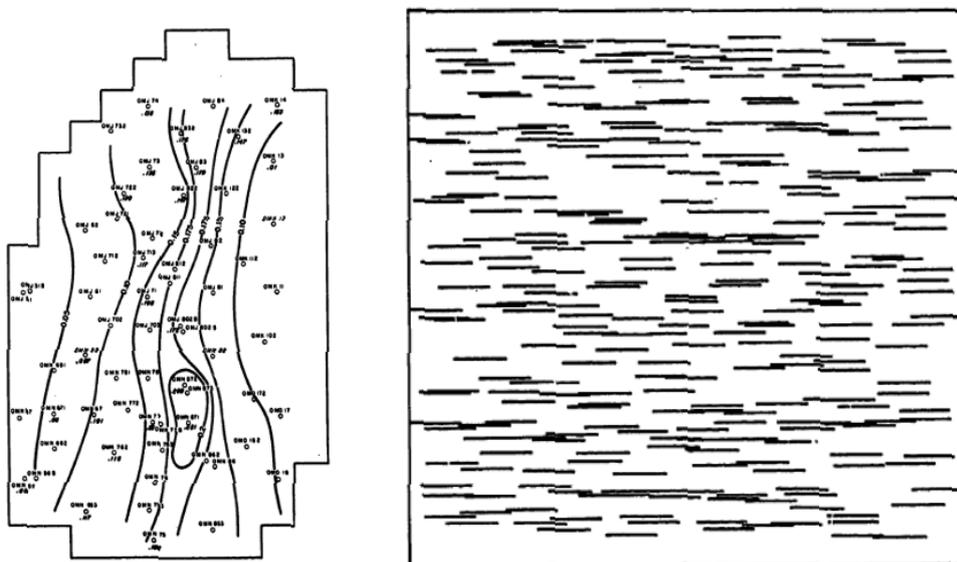


Рис. 2. Карта месторождений с выбранными сечениями для моделирования (слева) и результат компьютерного моделирования глинистых пропластков в сечении (справа). Заимствовано в [23]

Fig. 2. Reservoir map with intersections (left) and intersection example of shale layers model (right). From [23]

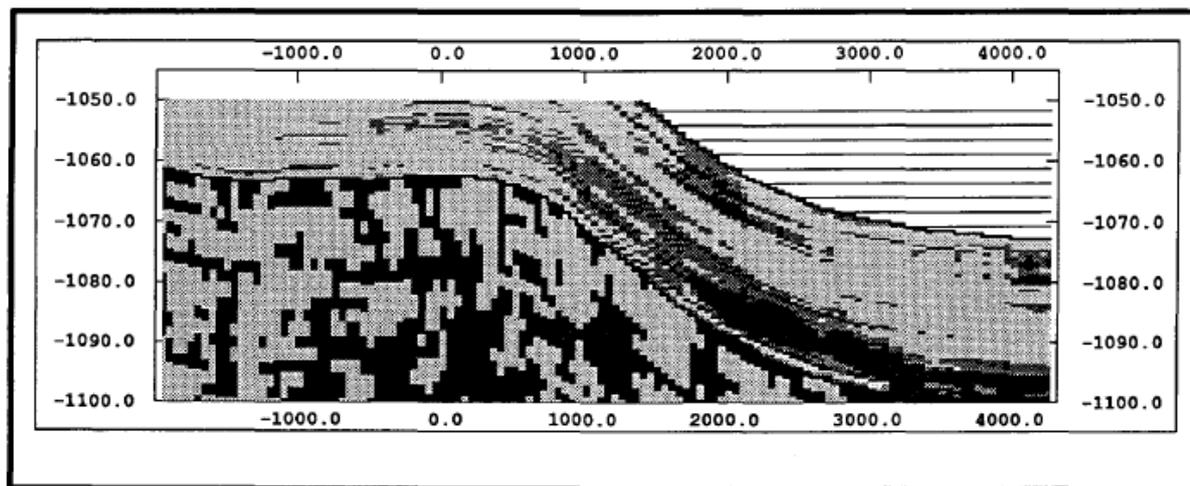


Рис. 3. Пример вертикальной секции литофаций геологической модели, построенной в программном пакете «HereSim 3D» (1990 г.) [27]

Fig. 3. Example of the vertical lithofacies section in geology model built in «HereSim 3D» package (1990) [27]

В центре Стенфордского университета под руководством А. Журнела и К. Дойча были разработаны методы стохастического и детерминистического моделирования на основе геостатистики. Большой вклад Стенфордского центра в геологическое моделирование заключается в создании бесплатной и открытой библиотеки «GSLIB», при помощи которой любой специалист имеет возможность решать производственные задачи, не обладая экспертными знаниями в геостатистике. Библиотека «GSLIB» создавалась в Стенфордском университете на протяжении 12 лет и была опубликована в 1992 г. Она охватывает все области геостатистики, такие как количественная оцен-

ка изменчивости (вариограммы), алгоритмы линейной геостатистики (кригинг), стохастические алгоритмы [28, 29].

Специалисты норвежского центра геологического моделирования в то же время под руководством Хеннинга Омре достигли больших успехов в разработке и применении методов объектного моделирования (рис. 4) и методов анализа неопределенностей [30–32]. Их работы были основаны на изучении месторождений формации BRENT, образованных в флювиальных условиях осадконакопления, для которых объектные методы моделирования подходили оптимально [4, 33].

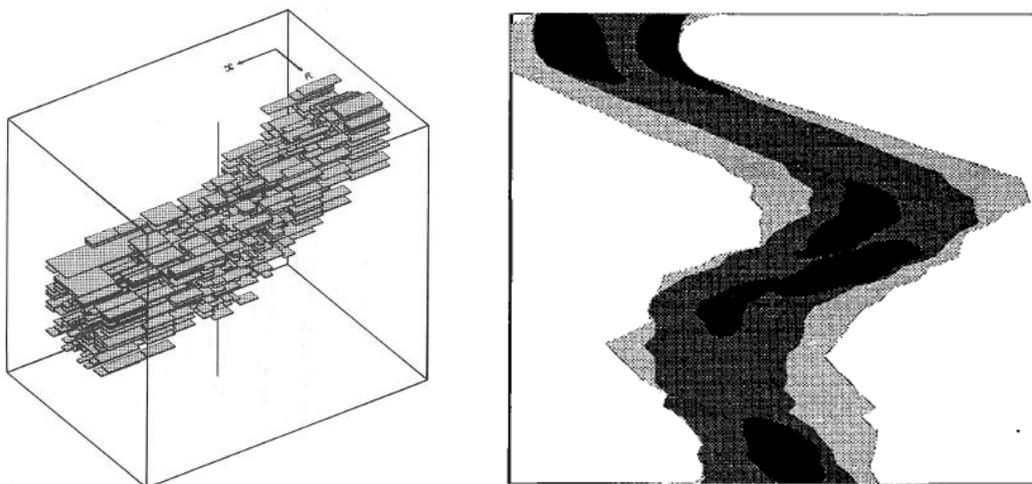


Рис. 4. Моделирование трехмерного распределения пропластков глин в пласте (слева) [30], объектная модель мультифациальных флювиальных отложений [31]

Fig. 4. 3D shale distribution model in reservoir (left) [30]. Object multifacies model of fluvial system [31]

Таким образом, к концу 1980-х и началу 1990-х гг. были заложены теоретические и практические основы массового использования трехмерных геологических моделей в нефтегазовой геологии, которое началось в 90-х гг. XX в. [17]. Первые пакеты геологического моделирования не предназначались для работы на персональных компьютерах и поэтому были сложны в использовании при решении производственных задач геологов-нефтяников. Тогда уже появились программные пакеты геологического трехмерного моделирования, такие как «Stratamodel», «STORM» (алгоритмы которого впоследствии были интегрированы в ПО «Irap RMS»), «GOCAD» и другие, которые стали драйверами создания геологических моделей. Они будут рассмотрены в следующем разделе.

Становление и развитие геологического моделирования как основы для изучения и оценки залежей нефти и газа (конец 1990-х и 2000-е гг.)

Дальнейшее развитие геологического моделирования неразрывно связывается с разработкой и улучшением коммерческих программных пакетов. Это стало возможным по нескольким причинам [2]:

- были разработаны теоретические основы математических принципов и алгоритмов, использующихся при построении трехмерных геологических моделей;
- были достигнуты существенные успехи в смежных областях – в обработке и интерпретации 3D сейсморазведки, а также в развитии принципов сиквенс-стратиграфии;
- увеличилась производительность рабочих станций и персональных компьютеров, позволяющая выполнять сложные математические расчёты за разумное время; кроме того, разработчики ПО для геологического моделирования постепенно конвертировали свои пакеты и делали возможным их использование на персональных компьютерах и в доступных для пользователей операционных системах;

- появились успешные коммерческие программы, которые обеспечивали процесс построения трехмерных моделей (анализ данных, стратиграфическая корреляция, визуализация и др.);
- был накоплен большой объем данных и опыт построения двумерных моделей в рамках подсчётов запасов, проектирования разработки, поисков и разведки месторождений нефти и газа.

Пионерами в создании полноценных программных пакетов можно назвать несколько организаций: консорциум «gOcad», «STRATAMODEL inc», «Landmark Graphics», «Radian», «Zycor», «Dynamic Graphics», «CGG-Petrosystems», «Geomath», «Geomatic», «Intera» и некоторые другие [34]. Впоследствии появились и другие продукты, в том числе и отечественные (рис. 5).

Первоначально пакеты для геологического моделирования требовали больших вычислительных мощностей и работали под управлением операционных систем семейства «UNIX» на вычислительных станциях большой мощности. Лишь к концу 1990-х гг. геологическое моделирование стало массово доступным в наиболее распространенной операционной системе «Microsoft Windows» и на рабочих станциях, которые использовались в нефтяных компаниях.

Одной из первых программ для геологического моделирования стал выпущенный в 1988 г. программный пакет «STRATAMODEL» [35]. Это была система для построения трехмерных геологических ячеистых моделей. Геологические модели, построенные в первых версиях ПО «STRATAMODEL», уже позволяли решать многие производственные задачи нефтяной отрасли [35]:

- подсчёт запасов углеводородов и вычисление комплексных атрибутов по ячейкам со сложными математическими и логическими операциями;
- обобщение данных по различным месторождениям и залежам;
- планирование уплотняющего и эксплуатационного бурения;

- проектирование и планирование применения методов улучшения нефтеотдачи;
- поиск и разведка новых залежей;
- получение основы для гидродинамического моделирования.

Для воспроизведения природных систем в «STRATAMODEL» была разработана геостратиграфическая ячеистая модель, которая отличалась от традиционной на тот момент регулярной ячеистой модели (рис. 6).

| 1988-2000 гг. | 2000-2010 гг. | 2010-2020 гг. |
|---|--|---|
| STRATAMODEL, GOCAD, FLOWGRID, RML, STORM, Irap RMS, HERESIM, EARTHVISION, PANTERRA, PETREL, GEOQUEST, FRACMAN | GEOCAP, JOA-JEWEL (JEWELSUITE), IGEOSS, DECISION SPACE, CMG-BUILDER, DV-GEO/ (GEOPLAT PRO-G), EUCLID, ПК НЕДРА | NAVIGATOR GEOLOGY DESIGNER, PH-ГЕОСИМ, АРТТЕО |

Рис. 5. Хронология появления значимых пакетов геологического моделирования. Синим цветом выделены отечественные разработки (заимствовано из [5] с дополнениями)

Fig. 5. Significant packages for geology modelling occurrence chronology. Russian packages are blue. From [5] with additions

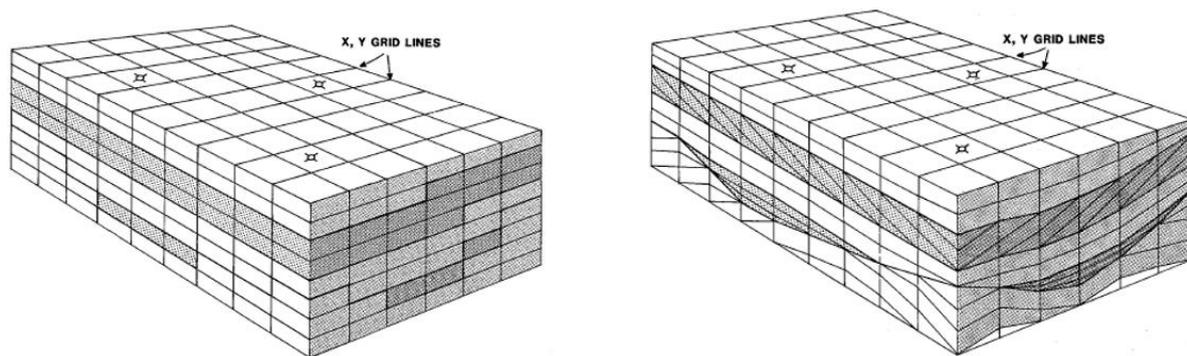


Рис. 6. Слева регулярная ячеистая модель, справа геостратиграфическая ячеистая модель в ПО «STRATAMODEL» (1988 г.). Заимствовано в [35]

Fig. 6. Orthogonal cellular model (left) and stratigraphic geocellular model (right) in geology package «STRATAMODEL» (1988). From [35]

Основные особенности геостратиграфической модели заключаются в возможности воспроизводить внутреннее геологическое строение пластов, которое позволяет использовать методы геостатистики для моделирования распределения свойств в пространстве и последующего гидродинамического моделирования.

Приблизительно в то же время (1993 г.) появился программный пакет «STORM» от норвежской компании Odin AS [36]. А в 1995 г. с использованием этих разработок компания «Geomatic AS» выпустила первый коммерческий интегрированный пакет для трехмерного геологического моделирования и визуализации – «Irap RMS» [37]. Первая коммерческая версия 5.0 позволяла строить стохастические трехмерные геологические модели нефтегазовых залежей для подсчета запасов и расчета профилей добычи скважин. Эти геомодели строились на основе данных геологического изучения обнажений, данных ГИС и их

интерпретации в скважинах, представлений о геологическом строении пластов, результатов испытаний и гидродинамических исследований скважин и других необходимых данных, которые представлялись в цифровом формате [36]. В 1997 г. компанией «Smedvig Technologies», которая возникла в результате поглощения и слияния компаний «Odin AS» и «Geomatic AS», в «Irap RMS» была интегрирована функциональность ПО «STORM», а именно стохастическая фациальная модель, стохастическое моделирование пространственных распределений ФЕС и технология «Rescaling».

Отличительной особенностью «Irap RMS» стали углубленная работа с объектными моделями и анализ неопределенностей на основе стохастических моделей. Кроме того, возможность построения многоуровневой иерархической структуры позволила в одной геологической модели объединять детерминистический и стохастический подходы, что стало мощ-

ным инструментом для изучения и оценки нефтегазовых залежей [38, 39]. Объектные модели были разработаны для более детального моделирования флювиальных отложений и опробованы на многих месторождениях Северного моря, оператором которых была компания «Statoil».

В 1999 г. в результате слияния двух крупных компаний – «Smedvig Technologies AS» и «Multi-Fluid ASA» – образовались компания и бренд «Rohar», которая активно продолжила развитие программного обеспечения для геологического и гидродинамического моделирования. В 2000 г. была выпущена версия «Igar RMS» 6.0, в которой помимо других улучшений были интегрированы менеджер графов моделирования и модуль проектирования траекторий скважин [37]. В 2003 г. были созданы модули для анализа неопределенностей и интегрированный гидродинамический симулятор («RMS Uncertainty» и «RMS Flowsim»). Поддержка моделирования трещиноватости появилась в версии 8 в 2006 г., а в 2008 г. реализована технология локального обновления стохастических моделей. В 2011 г. вышла обновленная версия пакета с сокращенным названием «RMS» и новыми возможностями по работе с 3D и 4D сейсмическими данными. А в 2012 г. путем интеграции технологии «GRAVA» был добавлен функционал для сейсмической инверсии. В декабре 2016 г. вышло ПО «RMS» версии 10, в которой была добавлена возможность автоматизации «Big Loop» для построения интегрированных моделей.

В настоящее время ПО «RMS» является одной из самых популярных программ для геологического моделирования в мире.

В 1996 г. группа специалистов, участвовавших в создании пакета «Igar RMS», выделилась в компанию «Technoguide», которая в 1998 г. выпустила первую версию своего пакета для геологического моделирования для операционной системы «Microsoft Windows» под названием «Petrel». Отличительной особенностью этого пакета была удачная реализация геометрии угловой точки, которая позволяла строить каркас сложных геологических моделей с учетом особенностей осадконакопления и с хорошей на тот момент визуализацией данных. Это, а также доступность пакета для работы в среде «Microsoft Windows» было основной причиной, благодаря которой пакет «Petrel» сразу обрел большую популярность, и в 2002 г. компания «Technoguide» была куплена компанией «Schlumberger» [40].

Во второй версии 2002 г. появился новый менеджер графов моделирования, который был очень прост в использовании и оптимально подходил для работы специалистам-геологам, не имевшим навыков программирования. В 2004 г. были внедрены модули для многовариантного моделирования и построения графов моделирования. В 2005 г. появилась его расширенная версия для анализа неопределенностей и оценки рисков. Построение модели трещиноватости появилось в версии «Petrel» 2007 г. [41], а в 2009 г. был внедрен модуль многоточечной статистики [40]. Одним из важных преимуществ ранних версий

«Petrel» являлась возможность интерпретации данных сейсморазведки и проведения атрибутивного анализа непосредственно в геологическом проекте без применения стороннего или специализированного ПО. К 2008 г. уже была реализована возможность структурной интерпретации, выделения разломов и расчета порядка 40 сейсмических атрибутов.

Поддержка инжиниринга пласта в виде модулей «Petrel RE» впервые была внедрена в версии «Petrel 2003SE», в которой были встроены поддержка симулятора линий тока «Front Sim» и модуль анализа проницаемости разломов «Flo Grid», а в 2004 г. появилась возможность интеграции с гидродинамическим симулятором «ECL» (впоследствии переименованным в «ECLIPSE»). В дальнейшем, до 2010 г., появились возможности для адаптации моделей на историю разработки и оценки неопределенностей с учетом результатов гидродинамического моделирования. В целом к 2010 г. программный пакет «Petrel» объединил в себе все доступные на тот момент функции по интерпретации сейсмических данных, построению геологических моделей терригенных и трещиноватых коллекторов, а также загрузку и использование гидродинамического моделирования. После 2010 г. развитие «Petrel» и других программ для моделирования идет по пути интеграции геологического, геомеханического, гидродинамического и бассейнового моделирования [40, 42, 43].

Из других программных пакетов, которые у геологов-нефтяников не пользуются широкой популярностью, но остаются востребованными, можно назвать «gOcad», изначально созданный одноименным консорциумом, «Jewel Suite», «Decision Space».

Программный продукт «gOcad» создавался с конца 1980-х гг. [44] и предназначался для моделирования как рудных, так и нефтегазовых месторождений. В дальнейшем он был объединен с программным продуктом «SKUA» компании «Paradigm» и сейчас развивается под названием «GOCAD SKUA».

Программный комплекс «JEWEL» от компании «JOA» появился в середине 2000-х гг. В дальнейшем его разработку продолжила компания «Baker Hughes» под названием «Jewel Suite». Отличительной особенностью этого пакета можно назвать технологию «tri-mesh», которая позволяет создавать каркасы моделей со сложной разломной и солянокупольной тектоникой, а также возможность совмещения с пакетом геомеханического моделирования «Jewel Suite Geomechanics». Другим полноценным программным комплексом для геологического моделирования является пакет «Decision Space», создание которого началось в середине 2000-х гг. компанией «Halliburton». Первоначально он имел ограниченный функционал, и только в 2010-х гг. появились необходимые модули для создания полноценных 3D моделей. В настоящее время пакеты «Jewel Suite» и «Decision Space» используются внутри указанных компаний для построения трехмерных геологических моделей нефтегазовых залежей.

Дополнительно следует отметить программный пакет «Fracman» компании «Golden». Этот пакет раз-

рабатывался как узкоспециализированный для создания геологических моделей трещиноватых коллекторов и изначально предназначался для нужд гидрогеологии. Однако отличная проработка функционала, необходимого для моделирования дискретных сеток трещин (defined fracture network, DFN), нашла применение и для нефтегазовых месторождений [45], особенно во времена, когда другие пакеты не имели собственных модулей для создания моделей трещиноватости.

Отечественные пакеты геологического моделирования

Интересна судьба отечественных разработок в области геологического моделирования. Из них следует упомянуть: 1) разработанные в г. Тюмени «Euclid-3», «PanTerra» и ПК «Недра»; 2) созданный в Центральной геофизической экспедиции пакет «DV-Geo», который в настоящее время развивается под названием «Geoplat Pro-G»; 3) сравнительно новый модуль геологического моделирования пакета «tNavigator» от компании RFD, названный «Дизайнер геологии»; 4) создаваемый корпоративный пакет для геомоделирования компании Роснефть «РН-Геосим».

Программная платформа «PanTerra» была создана в ОАО «СибНИИИМП» в г. Тюмени. Разработка началась в 1993 г. Патент зарегистрирован на ОАО «СибНИИИМП», в нем указаны 5 авторов: Ш.К. Раемгулов, С.В. Соколов, А.А. Аристов, В. Кондрашев и А.И. Филиппов. В 1995 г. вышла первая рабочая версия на платформе «Paradox». В 1998–1999 гг. начался переход на систему «SQL» – так называемая «PanTerra-II». Указанная СУБД использовалась помимо «СибНИИИМП» в некоторых других научно-исследовательских институтах: «РНТЦ» («Лукойл»), «СургутНИПИнефть», а также в «ТюмГНГУ». До 2013 г. данная версия СУБД активно использовалась в ОАО «СибНИИИМП», но с ликвидацией института активное использование практически прекратилось. В настоящее время СУБД «PanTerra-II» продолжает использоваться и развиваться в Тюменском Индустриальном Университете, где работает один из ее авторов.

ПК «Euclid-3» был создан в ООО «Сибтехнефть» также в г. Тюмени в конце 1990-х гг. Программа обладала функционалом для создания и визуализации трехмерных геологических моделей и их экспорта для гидродинамического моделирования. ПК «Euclid-3» использовался в ООО «Лукойл-Инжиниринг» и ООО «Недра-Консалт».

Ещё один пакет, созданный в г. Тюмени, назывался ПК «Недра». Он был разработан группой авторов под руководством кандидата технических наук А.Ю. Батурина [46] в начале 2000-х гг. Этот пакет состоял из набора модулей, необходимых для построения геологических моделей: картопостроения, анализа и обработки результатов интерпретации ГИС, расчёта и операций с кубами параметров, ремасштабирования сетки и выгрузки графических материалов. В 2007 г. права на ПК «Недра» были переданы в АО «Сургутнефтегаз». В настоящее время программный комплекс фактически не развивается, но его отдель-

ные элементы вошли в состав пакета «Техсхема», который предназначен для гидродинамического моделирования. С 2003 г. с использованием ПК «Недра» были построены трехмерные модели более 50 месторождений Западной Сибири, Ненецкого автономного округа и Республики Якутия, в том числе Федоровского, Рогожниковского, Талаканского и др.

С конца 1990-х гг. самостоятельные работы по созданию пакета для геологического моделирования велись также в АО «Центральная геофизическая экспедиция» (ЦГЭ). Пакет получил название «DV-Geo», и с его помощью производилось построение геологических моделей различных месторождений по проектам, выполняемым АО «ЦГЭ». В частности, с использованием этого пакета была построена единая геологическая модель уникального Самотлорского месторождения, включающая в себя более 16 тысяч скважин. С 2015 г. развитие этого пакета идет под названием «Geoplat Pro-G» в компании «Грид Поинт Дайнамикс». В этом программном продукте реализован полный функционал, необходимый для построения трехмерных геологических моделей и подсчёта запасов [47]. В настоящее время «Geoplat Pro-G» используется в ряде компаний для построения геологических моделей и активно продолжает развиваться.

С 2012 г. в компании ООО «Rock Flow Dynamics» (RFD) ведутся работы по созданию модуля для геологического моделирования на основе платформы «tNavigator» под названием «Дизайнер геологии». Первая версия модуля вышла в 2013 г. Последние версии этого пакета обладают полным функционалом для построения трехмерных геологических моделей со сложными сетками и имеют глубокую интеграцию с гидродинамическим симулятором «tNavigator». В настоящее время проект очень активно развивается и включает в себя помимо распространённых методов построения моделей и некоторые оригинальные, например, перспективный алгоритм «Amazonas» на основе машинного обучения.

В целом отечественные пакеты для геологического моделирования по отношению к зарубежным аналогам имеют вторичный характер и копируют их функционал с доработками и изменениями, необходимыми для работы с учетом Российских требований и сложившихся традиций. Однако в области экспертизы трехмерных геолого-гидродинамических моделей отечественные разработчики программного обеспечения опережают зарубежные программные продукты. В середине 2000-х гг. появились отечественные пакеты для экспертизы моделей, самые известные из которых – ПК «АТЛАС-Экспертиза» и ПК «Сфера. Ассистент», который изначально создавался под названием ПК «Траст», а также «TimeZYX». Последний пакет в настоящее время практически не используется, а созданный ООО «Тюменский институт нефти и газа» ПК «АТЛАС-Экспертиза» пользуется популярностью в нефтегазовых компаниях для проведения экспертизы геолого-гидродинамических моделей и продолжает активно развиваться. Полный функционал интегрированных в ПО пакетов для экспертизы, который позволяет проводить автоматизированный анализ

качества геолого-гидродинамических моделей, в зарубежных пакетах пока недостаточно реализован [48].

С 2018 г. в ООО «РН-БашНИПНефть» с участием авторов данной статьи ведется разработка корпоративного программного пакета для геологического моделирования компании ПАО «НК «Роснефть» «РН-Геосим». Настоящий исторический обзор подготовлен в ходе работы над этим программным продуктом для того, чтобы проанализировать причины успехов и неудач, допущенных при разработке и развитии существующих программных продуктов, и учесть их в перспективном отечественном программном пакете для геомоделирования. Таким образом, «РН-Геосим» ориентирован в первую очередь на решение проблем, встречающихся в реальном процессе построения геологических моделей в нефтяных компаниях, таких как объединение программных пакетов моделирования в универсальные комплексы, автоматизация процессов построения моделей при помощи графов моделирования, многопользовательская работа и развитие систем интеллектуальной поддержки [3]. Версия «РН-Геосим 1.0» выпущена в конце 2020 г. и уже имеет весь необходимый инструментарий для построения трехмерных геологических моделей, в том числе основанный и на оригинальных методах и алгоритмах, таких как спектральное моделирование и др. Из существенных отличий «РН-Геосим» от существующих пакетов стоит отметить наличие тесной интеграции с другими корпоративными продуктами, такими как «РН-КИН», «РН-КИМ», а также ориентированность алгоритмов импорта, экспорта и обработки данных на отечественные требования и задачи.

Заключение

Геологическое моделирование за последние 70 лет прошло несколько этапов развития от простейших одномерных моделей осадочных толщ до комплексных геолого-гидродинамических моделей резервуаров, учитывающих все доступные для описания аспекты строения и изменчивости свойств горных пород, флюидов, напряженного состояния и строения

резервуаров. Первая одномерная геологическая модель ритмических толщ была построена советским геологом А.Б. Вистелиусом в 1948–1949 гг., а в 1978 г. была построена первая трехмерная геологическая модель Алжирского месторождения Hassi-Messaoud. В 1990-х гг. с появлением пакетов для трехмерного геологического моделирования началось активное внедрение геомodelей в научную и производственную деятельность в нефтяной геологии. В это время были разработаны основные методические подходы к построению моделей, определены этапы и стадии их построения. В 2000-х гг. геологическое моделирование стало основным инструментом геологов для исследования и оценки залежей нефти и газа вместе с переходом программных пакетов на персональные компьютеры. В этот период развитие шло по пути интеграции геомodelей с сейсмическими данными, разработки методов многоточечной статистики, моделирования трещиноватости, повышения удобства инструментов и улучшения визуализации данных. Кроме того, в 2000-х гг. геологические модели в виде основы для гидродинамических расчетов стали широко использоваться для проектирования разработки месторождений. В настоящее время в процесс построения геомodelей активно внедряются модули для бассейнового, тектонического, геомеханического моделирования, и активно ведутся исследования по улучшению интегрированных проектов за счёт использования комплексных геолого-гидродинамических моделей. Самыми последними трендами в пакетах геомоделирования стали нововведения, связанные с технологиями машинного обучения, облачного хранения данных и многопользовательских режимов.

Авторы выражают глубокую признательность специалистам, которые помогли в написании и редакции текста настоящей статьи и внесли большое количество ценных замечаний и уточнений, которые позволили существенно улучшить результат работы: Владимиру Анатольевичу Аксарину, Леониду Евгеньевичу Шмарьяну, Анатолию Владимировичу Рыбникову, Наталье Валентиновне Калашиковой и Юлии Викторовне Литвиненко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The SPE online library of technical literature for the oil and gas industry. URL: <https://onepetro.org> (дата обращения 05.09.2020).
2. Закревский К.Е.: Геологическое 3D моделирование. – М.: Изд-во «Маска», 2009. – 376 с.
3. К вопросу о перспективах создания корпоративного программного обеспечения геологического моделирования / М.И. Саакян, К.Е. Закревский, А.Е. Лепилин, Ч.Р. Ахметов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 50–54.
4. Cosentino L. Integrated reservoir studies. – Paris: Editions Technip, 2001. – 310 p.
5. Perrin M., Rainaud J.-M.: Shared earth modeling. Knowledge driven solutions for building and managing subsurface 3D geological model. – Paris: Editions Technip, 2013. – 399 p.
6. Predictive geologic and geomechanical models for pad development in the Delaware basin. URTEC-2020-3309-MS / R. McIntyre, J. Gaines, S. Gardner, M. Mediani, C. Hammerquist, X. Li, M. Paryani, N. Umholtz // SPE/AAPG/SEG Unconventional resources technology conference, 2020. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/URTEC-2020-3309-MS> (дата обращения 05.09.2020).
7. Вистелиус А.Б. Простейшие задачи математической обработки в литологии и пути их решения // Литологический сборник ВНИГРИ. – 1948. – № 1. – С. 125–130.
8. Вистелиус А.Б. К вопросу о механизме слоеобразования // Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 65. – № 2. – С. 191–194.
9. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии (определение предмета, изложение аппарата). – Л.: Наука, 1980. – 389 с.
10. Leclerc J.L. Histoire Naturelle, generale et particuliere. V. I, II. – Aux DeuxPons. Sanson a. Compagnie, 1785. – 332 p.
11. Reyer E. Beitrage zur Physik der Eruptionen und der Eruptivgesteine. – Vienna, 1877. – 225 p.
12. Harker A. The natural history of igneous rocks. – London: Methuen a. Co, 1909. – 384 p.
13. Richardson W.A., Sneesby G. The frequency distribution of igneous rocks // Miner. Magaz. a. Journ. Miner. Soc. – 1922. – V. 19. – № 97 – P. 190–207.
14. Левинсон-Лессинг Ф.Ю. О пределах и подразделениях семейства андезитов // Вестн. Геол. ком. – 1924. – № 6. – С. 723–735.
15. Krumbain W.C. The probable error of sampling sediments for mechanical analysis // Amer. J. Sci. – 1934. – V. 227. – № 159. – P. 204–214.

16. Merriam D.F. Andrei Borisovich Vistelius: a dominant figure in 20th Century mathematical geology // Natural resources research. – 2001. – V. 10. – № 4. – P. 297–304.
17. Dubrule O., Damsleth E. Achievements and challenges in petroleum geostatistics // Petroleum Geoscience. – 2001. – V. 07. – P. 1–7.
18. Matheron G. Traite de geostatistique applique. – Paris: Editions Technip, 1962. – 409 p.
19. Krige D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand // Journal of the Chemistry, Metallurgy and Mining Society of South Africa. – 1952. – № 8. – P. 119–139.
20. Merriam D.F., Davic J.C. Geologic modeling and simulation of sedimentary systems. – New York: Springer-science+business media, 2001. – 351 p.
21. Matheron G., Kleingeld W.J., The evolution of geostatistics // 20th international symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries. – Johannesburg, 1987. – V. 3. – P. 9–12.
22. Dubrule O. Geostatistics for seismic data integration in earth models. – Tulsa: European association of geoscientists and engineers, 2003. – 281 p.
23. Delhomme E., Giannesini J. New reservoir description techniques improve simulation results in Hass-Messaoud field Algeria. SPE 8435 // 54th SPE Annual Technical conference and Exhibition. – Dallas, USA, 1979. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-8435> (дата обращения 05.05.2020).
24. Dubrule O. Geostatistics in petroleum geology. – Houston: American Association of Petroleum Geologists, 1998. – 250 p.
25. Renard R.D. Bluepack 3-D and its use in the petroleum industry // 5th SPE petroleum computer conference. – Denver, USA, 1990. – P. 197–204.
26. 3D reservoir visualization. SPE 22301-PA / B. Van, J. Pajon, P. Joseph, J.M. Chautru // SPE petroleum computer conference. – Dallas, USA, 1991. – P. 1310–1314.
27. Touffait Y., Beucher H. A 3D integrated structure for computer-aided reservoir characterization. SPE 20348 // 5th SPE petroleum computer conference. – Denver, USA, 1990. – P. 171–180.
28. Deutsch C.V., Journel A.G. GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 369 p.
29. Deutsch C.V. Geostatistical reservoir modeling. – Oxford: Oxford University Press, 2002. – 376 p.
30. Haldorsen H.H. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). SPE 16751 // 62nd SPE annual technical conference and exhibition. – Dallas, USA, 1987. – P. 575–589.
31. Egeland T., Georgsen F. Multifacies modeling of fluvial reservoirs. SPE 26502 // 68th SPE annual technical conference and exhibition. – Houston, USA, 1993. – P. 863–872.
32. An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures. SPE 24276 / P. Abrahamsen, T. Egeland, O. Lia, H. Omre // SPE European petroleum computer conference. – Norway, 1992. – P. 151–161.
33. The geometry of fluvial channel bodies: empirical characterization and implications for object-based models of the subsurface / L. Colomera, N.P. Mountney, G. Medici, L. Jared West // AAPG bulletin. – 2019. – V. 103. – № 4. – P. 905–929.
34. Xinghe Y., Shengli L., Shumli L. Clastic hydrocarbon reservoir sedimentology. – Cham: Springer international publishing, 2018. – 712 p.
35. Swanson D.C. A new geological volume computer modeling system for reservoir description. SPE 17579 // SPE international meeting. – Tianjin, China, 1988. – P. 293–302.
36. STORM: integrated 3D stochastic reservoir modeling tool for geologists and reservoir engineers. SPE- 27563-PA / R.B. Bratvold, L. Holden et al. // SPE computer applications conference. – Aberdeen, United Kingdom, 1995. – P. 58–67.
37. История компании Roxar. URL: <http://roxar.ru/about-us/history/> (дата обращения 10.05.2020).
38. Damsleth E., Omre H. Geostatistical approaches in reservoir evaluation. SPE 37681-JPT // Technology today series conference. – Wollongong, Australia, 1997. – P. 498–501.
39. Wietzerbin L.J. Parametrization of complex 3D heterogeneities: a new CAD approach. SPE 26423 // SPE Annual technical conference and exhibition. – Houston, USA, 1993. – P. 11–18.
40. Petrel 20 years. URL: <https://books.google.ru/books?id=GWN9DwAAQBAJ> (дата обращения 10.05.2020).
41. Schlumberger Petrel 2007.1.2 Deployment guide. URL: <https://docgo.net/petrel-2007-1-2-deployment-guide> (Дата обращения 10.05.2020)
42. When effective integration drives the development: a successful case history. SPE-197900-MS / E. Spelta, V. Caronni, G. Carrasquero, M. Catanzaro, M. Rossi, R.L. Tagliamonte, A. Valdistorlo // Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference. – Abu Dhabi, UAE, 2019. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-197900-MS> (дата обращения 05.09.2020).
43. Geological modeling in structurally complex settings using a depositional space and cut-cell unstructured grids. SPE-183960-MS / A. Levannier, A. Chabbert, M. Neumaier, A. Benabbou, T. Viard, L. Mace, S. Santoshini, F. Lepage, E. Malvesin, T. Laverne, C. Daly, C. Buchholz, Y. Wang // SPE middle east oil & gas show and conference. – Manama Kingdom of Bahrain, 2017. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-183960-MS> (дата обращения 05.09.2020).
44. Mallet J.L., Jacquemin P., Cheimanoff N. GOCAD project: geometric modeling of complex geological surfaces // 1989 SEG annual meeting. – Dallas, USA, 1989. – P. 27–30.
45. Wang C.J., Vecchiarelli A. A geostatistical approach to modelling DFN. ARMA-2019-0376 // 53rd U.S. Rock mechanics/geomechanics symposium. – New York, USA, 2019. URL: <https://onepetro.org/conference-paper/ARMA-2019-0376> (дата обращения 05.05.2020).
46. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте № 2002610757.
47. Перепечкин М.В. Технология построения геологических моделей по геолого-геофизическим данным в программном комплексе DV-Geo: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007. – 22 с.
48. Новый адаптивный подход к геолого-гидродинамическому моделированию длительно разрабатываемых месторождений и залежей / Е.Н. Тараскин, И.С. Гутман, С.А. Руднев, А.З. Захарян, С.О. Урсегов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 78–83.

Поступила 12.04.2021 г.

Информация об авторах

Закревский К.Е., кандидат геолого-минералогических наук, старший менеджер-эксперт по геологическому моделированию ПАО «НК «Роснефть».

Попов В.Л., начальник отдела геологического моделирования АО «ТомскНИПИнефть».

UDC 553.984

THE HISTORY OF DEVELOPMENT OF 3D GEOLOGY MODELING AS A METHOD FOR STUDYING OIL AND GAS RESERVOIRS

Konstantin E. Zakrevskiy¹,
geo-model@yandex.ru

Viktor L. Popov²,
vlp14788@gmail.com

¹ Rosneft Oil Company,
26/1, Sofiyskaya embankment, Moscow, 117997, Russia.

² JSC «TomskNIPIneft»,
72, Mira avenue, Tomsk, 634026, Russia.

The relevance of the research is caused by the widespread application of geology models to study oil and gas reservoirs. At present time, by the government regulations in Russia, all field development projects must be done with geology and simulation models.

The main aim of the research is to study and describe evolution of 3D geomodeling as a main method of oil and gas geology. Commonly used geology modeling packages history and features were revealed in order to determine industry interests and trends, advantages and drawbacks of existing software.

Object of the research is 3D geology modeling as a method to study oil and gas reservoirs.

Methods: study and compilation of the published papers and internet sources on the topic of geology modeling and appropriate software evolution.

Results. The paper describes the main steps of 3D geology modeling evolution and the existing software for geology models creation. There are four stages of geology modeling history. First stage is related to recognition of importance of math modeling to describe geology systems. The second stage took part in 1950–1970-s and lay occurrence of such branch of science as mathematical geology and its branch – geostatistics. In early 1980-s first 3D reservoir models were created and used for oil and gas pools study. It inferred active development of geomodeling and occurrence of first software to reservoir modeling in 1980-s. In early 1990-s geology modeling started to enter industry and many geologists used it to study and evaluate oil and gas reservoirs. During 1990-s and 2000-s most of commonly used geomodeling methods and procedures were developed. At present time there is a trend in geomodeling to integrate all geoscience data into one project which should include geology, seismic, simulation, geomechanics and other aspects of reservoir study. Since 2018 the corporate software for geology modeling is created in Rosneft oil company. All determined advantages and new methods are integrated or going to be integrated into new geomodeling package «RN-Geosim».

Key words:

Petroleum geology methods, geology modeling, geomodeling software, geology modeling evolution, RN-Geosim.

The authors greatly appreciate the thoughtful comments and suggestions of Vladimir A. Aksarin, Leonid E. Shmaryan, Anatoliy V. Ribnikov, Natalya V. Kalashnikova and Yulia V. Litvinenko.

REFERENCES

1. *The SPE online library of technical literature for the oil and gas industry.* Available at: <https://onepetro.org> (accessed 5 September 2020).
2. Zakrevskiy K.E. *Geologicheskoe 3D modelirovanie* [Geology 3D modelling]. Moscow, Maska Publ., 2009. 376 p.
3. Saakyan M.I., Zakrevskiy K.E., Gazizov R.K., Lepilin A.E., Ryzhikov E.A. The prospects of corporate geological modeling software creation. *Oil industry*, 2019, no. 11, pp. 50–54. In Rus.
4. Cosentino L. *Integrated reservoir studies.* Paris, Editions Technip, 2001. 310 p.
5. Perrin M., Rainaud J.-M.: *Shared earth modeling. Knowledge driven solutions for building and managing subsurface 3D geological model.* Paris, Editions Technip, 2013. 399 p.
6. McIntyre R., Gaines J., Gardner S., Mediani M., Hammerquist C., Li X., Paryani M., Umholtz N. Predictive geologic and geomechanical models for pad development in the Delaware basin. URTEC-2020-3309-MS. *SPE/AAPG/SEG Unconventional resources technology conference.* Virtual, 2020. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/URTEC-2020-3309-MS> (accessed 5 September 2020).
7. Vistelius A.B. Prosteyschie zadachi matematicheskoy obrabotki v litologii i puti ikh resheniya [Simple tasks of mathematical processing in lithology and their solutions]. *Litologicheskii sbornik VNIIGRI*, 1948, no. 1, pp. 125–130.
8. Vistelius A.B. On the question of layers occurrence. *Doklady AN SSSR*, 1949, vol. 65, no. 2, pp. 191–194. In Rus.
9. Vistelius A.B. *Osnovy matematicheskoy geologii (opredelenie predmeta, izlozhenie apparata)* [The mathematical geology basics (study definition, apparatus description)]. Leningrad, Nauka Publ., 1980. 389 p.
10. Leclerc J.L. *Histoire Naturelle, generale et particuliere. V. I, II* [Natural History, General and Particular]. Aux DeuxPonts. Sanson a. Compagnie, 1785. 332 p.
11. Reyer E. *Beitrage zur Physik der Eruptionen und der Eruptivgesteine* [Contributions to the physics of volcanic and igneous rocks]. Vienna, 1877. 225 p.
12. Harker A. *The Natural History of Igneous Rocks.* London, Methuen a. Co, 1909. 384 p.
13. Richardson W.A., Sneesby G. The frequency distribution of igneous rocks. *Miner. Magaz. a. Journ. Miner. Soc.*, 1922, vol. 19, no. 97, pp. 190–207.
14. Levinson-Lessing F.U. O predelakh i podrazdeleniyakh semeystva andezitov [About limits and division of the andesite family]. *Vestnik geologicheskogo komiteta*, 1924, no 6, pp. 723–735.
15. Krumbein W.C. The probable error of sampling sediments for mechanical analysis. *Amer. J. Sci.*, 1934, vol. 227, no. 159, pp. 204–214.
16. Merriam D.F. Andrei Borisovich Vistelius: a dominant figure in 20th Century mathematical geology. *Natural resources research*, 2001, vol. 10, no. 4, pp. 297–304.

17. Dubrule O., Damsleth E. Achievements and challenges in petroleum geostatistics. *Petroleum Geoscience*, 2001, vol. 07, pp. 1–7.
18. Matérn G. *Traite de géostatistique appliquée* [Geostatistics application fundamentals]. Paris, Editions Technip, 1962. 409 p.
19. Krige D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemistry, Metallurgy and Mining Society of South Africa*, 1952, no. 8, pp. 119–139.
20. Merriam D.F., Davic J.C. *Geologic modeling and simulation of sedimentary systems*. New York, Springer-science+business media, 2001. 351 p.
21. Matheron G., Kleingeld W.J. The evolution of geostatistics. *20th international symposium on the application of computers and mathematics in the mineral industries*. Johannesburg, 1987. Vol. 3, pp. 9–12.
22. Dubrule O. *Geostatistics for seismic data integration in earth models*. Tulsa, European association of geoscientists and engineers, 2003. 281 p.
23. Delhomme E., Giannesini J. New reservoir description techniques improve simulation results in Hass-Messaoud field Algeria. SPE 8435. *54th SPE Annual Technical conference and Exhibition*. Dallas, USA, 1979. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-8435> (accessed 5 May 2020).
24. Dubrule O. *Geostatistics in petroleum geology*. Houston, American Association of Petroleum Geologists, 1998. 250 p.
25. Renard R.D. Bluepack 3-D and its use in the petroleum industry. *5th SPE petroleum computer conference*. Denver, USA, 1990, pp. 197–204.
26. Van B., Pajon J., Joseph P., Chautru J.M. 3D reservoir visualization. SPE 22301-PA. *SPE petroleum computer conference*. Dallas, USA, 1991. pp. 1310–1314.
27. Touffait Y., Beucher H. A 3D integrated structure for computer-aided reservoir characterization. SPE 20348. *5th SPE petroleum computer conference*. Denver, USA, 1990. pp. 171–180.
28. Deutsch C.V., Journel A.G. *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford, Oxford University Press, 1997. 369 p.
29. Deutsch C.V. *Geostatistical Reservoir modeling*. Oxford, Oxford University Press, 2002. 376 p.
30. Haldorsen H.H. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). SPE 16751. *62nd SPE annual technical conference and exhibition*. Dallas, USA, 1987. pp. 575–589.
31. Egeland T., Georgsen F. Multifacies modeling of fluvial reservoirs. SPE 26502. *68th SPE annual technical conference and exhibition*. Houston, USA, 1993. pp. 863–872.
32. Abrahamsen P., Egeland T., Lia O., Omre H. An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures. SPE 24276. *SPE European petroleum computer conference*. Norway, 1992. pp. 151–161.
33. Colombero L., Mounney N.P., Medici G., Jared West L. The geometry of fluvial channel bodies: Empirical characterization and implications for object-based models of the subsurface. *AAPG bulletin*, 2019. Vol. 103, no. 4, pp. 905–929.
34. Xinghe Y., Shengli L., Shumli L. *Clastic hydrocarbon reservoir sedimentology*. Cham, Springer international publishing, 2018. 712 p.
35. Swanson D.C. A new geological volume computer modeling system for reservoir description. SPE 17579. *SPE international meeting*. Tianjin, China, 1988. pp. 293–302.
36. Bratvold R.B., Holden L. STORM: Integrated 3D Stochastic Reservoir Modeling Tool for Geologists and Reservoir Engineers. SPE-27563-PA. *SPE computer applications conference*. Aberdeen, United Kingdom, 1995. pp. 58–67.
37. *Istoriya kompanii Roxar* [Roxar company history]. Available at: <http://roxar.ru/about-us/history/> (accessed 10 May 2020). In Rus.
38. Damsleth E., Omre H. Geostatistical approaches in reservoir evaluation. SPE 37681-JPT. *Technology today series conference*. Wollongong, Australia, 1997. pp. 498–501.
39. Wietzerbin L.J. Parametrization of complex 3D heterogeneities: a new CAD approach. SPE 26423. *SPE Annual technical conference and exhibition*. Houston, USA, 1993. pp. 11–18.
40. Petrel 20 years. Available at: <https://books.google.ru/books?id=GWN9DwAAQBAJ> (accessed 10 May 2020).
41. *Schlumberger Petrel 2007.1.2 Deployment guide*. Available at: <https://docgo.net/petrel-2007-1-2-deployment-guide> (accessed 10 May 2020).
42. Spelta E., Caronni V., Carrasquero G., Catanzaro M., Rossi M., Tagliamonte R.L., Valdistorlo A. When effective integration drives the development: a successful case history. SPE-197900-MS. *Abu Dhabi international petroleum exhibition & conference*. Abu Dhabi, UAE, 2019. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-197900-MS> (accessed 5 September 2020).
43. Levannier A., Chabbert A., Neumaier M., Benabbou A., Viard T., Mace L., Santoshini S., Lepage F., Malvesin E., Laverne T., Daly C., Buchholz C., Wang Y. Geological modeling in structurally complex settings using a depositional space and cut-cell unstructured grids. SPE-183960-MS. *SPE middle east oil & gas show and conference*. Manama Kingdom of Bahrain, 2017. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/SPE-183960-MS> (accessed 5 September 2020).
44. Mallet J.L., Jacquemin P., Cheimanoff N. GOCAD Project: geometric modeling of complex geological surfaces. *1989 SEG annual meeting*. Dallas, USA, 1989. pp. 27–30.
45. Wang C.J., Vecchiarelli A. A geostatistical approach to modelling DFN. ARMA-2019-0376. *53rd U.S. Rock mechanics/geomechanics symposium*. New York, USA, 2019. Available at: <https://onepetro.org/conference-paper/ARMA-2019-0376> (accessed 5 September 2020).
46. *Svidetelstvo o registratsii programmy dlya EVM v Rospatente № 2002610757* [Software registration certificate in Rospatent no. 2002610757].
47. Perepechkin M.V. *Tekhnologiya postroeniya geologicheskikh modeley po geologo-geofizicheskim dannym v programnom komplekse DV-Geo*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geology models creation technology on the basis of geology-geophysics data in DV-Geo software package. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2007. 22 p.
48. Taraskin E.N., Gutman I.S., Rudnev S.A., Zakharian A.Z., Ursegov S.O. New adaptive approach to geological and hydrodynamic modeling of fields and reservoirs with long production history. *Oil industry*, 2017, no. 12, pp. 78–83. In Rus.

Received: 12 April 2021.

Information about the authors

Konstantin E. Zakrevskiy, Cand. Sc., manager-expert, Rosneft oil company.
Viktor L. Popov, head of the department, JSC «TomskNIPIneft».