

УДК 550.8

А.Ю. Дегтерёв, В.Е. Кан

## Актуальные проблемы геологического моделирования подземных хранилищ газа в водоносных пластах

**Ключевые слова:** геологическое моделирование, трехмерный, ПХГ, неоднородность, цензурированность, геоинформационная система, корреляция, интерполяция, декластеризация, ремасштабирование.

**Keywords:** geological modelling, three-dimensional, underground gas storage (UGS), heterogeneity, sample censoring, geoinformation system, correlation, interpolation, declustering, rescaling.

В настоящее время математическое моделирование нашло широкое применение в самых различных областях знания, в том числе и в геологии. Цифровые геологические модели, создаваемые с помощью ресурсов вычислительных машин, стали одним из традиционных инструментов решения различных геолого-технологических задач. Широко применяется геологическое моделирование и для решения задач подземного хранения газа. Наиболее распространены подземные хранилища газа (ПХГ) в истощенных месторождениях и водоносных пластах. Поскольку оба типа объектов принципиально близки к нефтегазовым месторождениям, близки и подходы к их моделированию, традиционно используются методики и программные продукты, первоначально разработанные для моделирования нефтегазовых месторождений.

Процесс моделирования нефтегазовых месторождений и ПХГ подразумевает последовательное построение трех взаимосвязанных моделей: петрофизической, геологической и гидродинамической (рис. 1). При петрофизическом моделировании решается задача прогноза фильтрационно-емкостных свойств по каждой из скважин на основе совокупности имеющихся геофизических, керновых и промысловых данных. Полученные при этом прогнозные значения используются в дальнейшем в качестве исходных данных на этапе геологического моделирования. В ходе геологического моделирования происходит комплексирование имеющейся пространственной, геолого-геофизической и промысловой информации для построения непротиворечивой и геологически корректной математической модели объекта. Полученная модель, помимо использования в качестве базы упорядоченной и взаимосвязанной геолого-геофизической информации по объекту и основы для комплексирования данных мониторинга эксплуатации, выступает также в качестве фундамента дальнейшего моделирования процессов фильтрации на этапе гидродинамического (фильтрационно-го) моделирования.

Гидродинамическое моделирование ПХГ обладает очевидными особенностями, обусловленными быстротечностью и переменной направленностью фильтрационных процессов, однако геологическому моделированию ПХГ также присущ ряд специфических черт. Практика построения геологических моделей ПХГ показала, что данная задача, хотя и близка к задаче геологического моделирования нефтегазового месторождения, все же обладает некоторыми отличительными чертами, требующими применения специализированных методик и подходов [1].

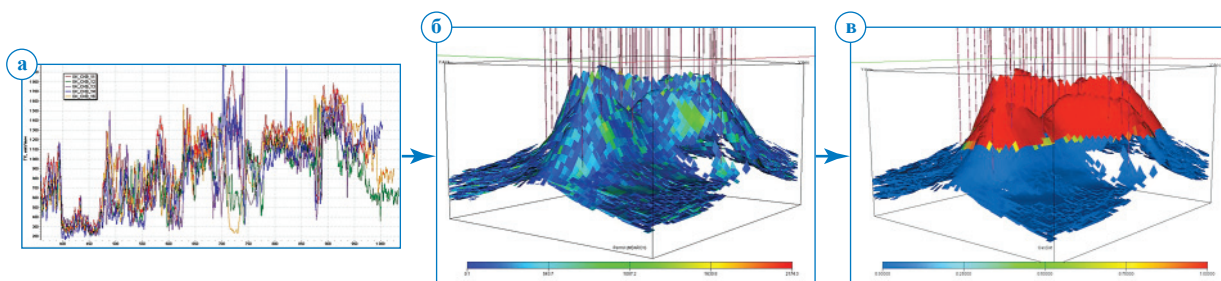


Рис. 1. Типовая последовательность моделирования ПХГ:

а – петрофизическая модель; б – геологическая модель; в – гидродинамическая модель

При использовании в процессе моделирования ПХГ некоторых программных продуктов и инструментов, первоначально разработанных для месторождений, зачастую проявляются их принципиальные ограничения, в обычных случаях скрытые или менее заметные. Неучет подобной специфики на практике может приводить к построению некорректных моделей на основе даже полностью корректных исходных данных [2].

Специализированная литература по геологическому моделированию ПХГ отсутствует, в то время как применяемые методические и регламентные документы [3–5] и существующая учебная литература [6, 7], написанные для моделирования месторождений, не рассматривают вопросы моделирования ПХГ. Все это требует рассмотрения геологического моделирования ПХГ как самостоятельной задачи, хотя решение поставленных проблем может впоследствии использоваться и для повышения достоверности моделирования месторождений [8].

Основные характерные особенности задачи моделирования ПХГ:

- *отсутствие* (для ПХГ в водоносном пласте) или *незначительность* (для ПХГ в истощенном месторождении) *начальных запасов газа*. Текущие объемы газа и конфигурация залежи могут изменяться в широких пределах в зависимости от объемов закачанного и отобранного газа и принятых режимов эксплуатации хранилища. Геологическая модель позволяет оценить лишь общий поровый объем структуры в пределах некоторого контура. Оценка конфигурации газовой залежи и текущих объемов

газа по данным ГИС-контроля (здесь ГИС – геофизические исследования скважин) на основе геологической модели хотя и возможна, но, как правило, недостаточно достоверна, поскольку не учитывает физику процесса. Относительно достоверно текущее распределение газовой залежи может быть определено только по данным гидродинамического моделирования;

- *недостаточная первоначальная геолого-геофизическая изученность объектов* (применительно к ПХГ в водоносном пласте). Поскольку в типовом случае объекты ПХГ в водоносном пласте – это изначально «пустые» структуры, выведенные из консервации, их исходная изученность существенно ниже, чем у месторождений. Фактически на первоначальных этапах проектирования ПХГ структуры, как правило, недоизучены. Архивные материалы не всегда доступны в полном объеме, зачастую первичные материалы отсутствуют и доступны лишь результаты их интерпретации и т.д.;

- *крайне неоднородное* (в случае ПХГ в водоносном пласте) *площадное распределение скважин* и соответственно *скважинных данных*. Технология эксплуатации ПХГ подразумевает крайне плотное размещение эксплуатационных скважин именно в купольной части структуры (рис. 2). Высокая неоднородность размещения скважинных данных сказывается на работе некоторых алгоритмов анализа данных, фациального и параметрического моделирования, традиционно используемых при геологическом моделировании. Такие алгоритмы, будучи корректными при относительной однородности данных, в случае их высокой неоднородности могут приводить к получению некорректных результатов;

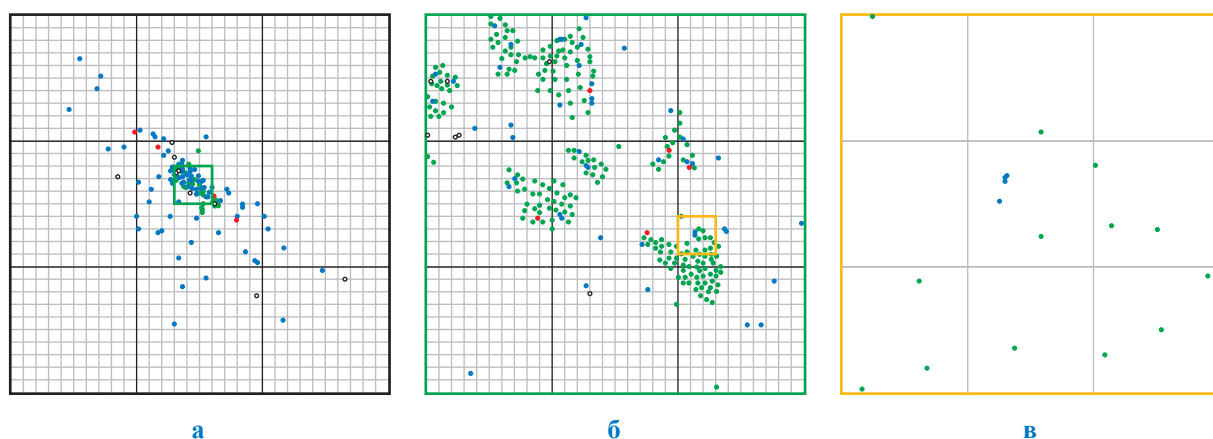


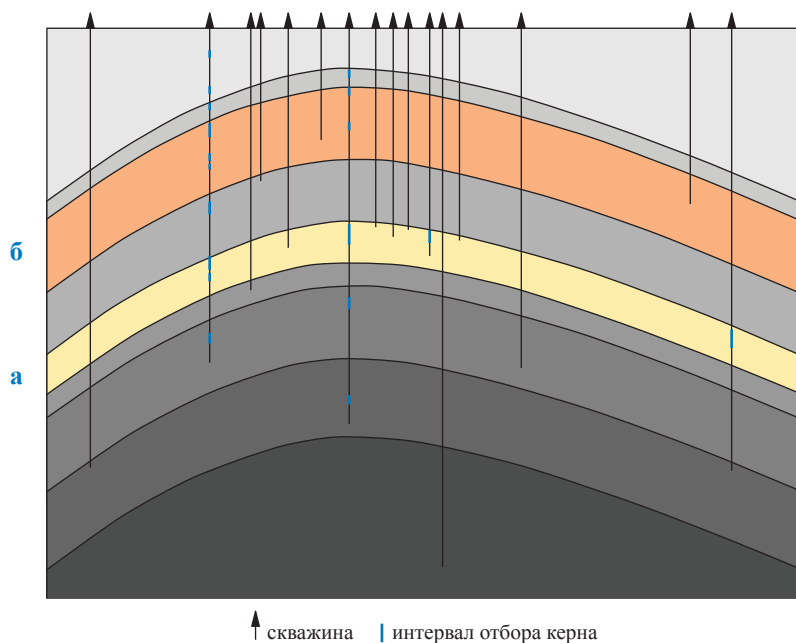
Рис. 2. Неоднородность распределения скважин на ПХГ в водоносном пласте на уровнях: а – объекта; б – части объекта; в – локальном

- *неоднородность распределения исходных скважинных данных по глубине.* По технологическим причинам скважины, вскрывающие пласт-коллектор, во многих случаях не добуриваются до подошвы пласта. Это не позволяет получить структурные отбивки пласта и другие геолого-геофизические данные о его нижней части. Таким образом, при обилии эксплуатационных скважин, данных, характеризующих нижнюю часть пласта-коллектора и нижележащие отложения, зачастую оказывается крайне немного. Как результат, модель пласта-коллектора часто оказывается существенно неоднородной по представительности исходных данных и, соответственно, достоверности моделирования (рис. 3);

- *особенности доизучения объекта в процессе эксплуатации.* По технологическим причинам новые скважины бурятся в хорошо изученных областях, в слабоизученных областях их бурят гораздо реже. Из-за рассмотренной ранее специфики размещения эксплуатационных скважин бурение новых скважин не приводит к значимому уточнению представлений о геологическом строении объекта. В связи с этим, несмотря на десятилетия эксплуатации ПХГ, зачастую необходимо проводить специальные мероприятия по их доизучению;

- *вопросы герметичности ПХГ.* Если месторождения являются объектами, формирую-

щимися в масштабах геологического времени, и их герметичность не вызывает сомнений, то герметичность ПХГ в водоносном пласте может быть поставлена под сомнение: ее надо сначала доказать, а затем все равно контролировать. Кровлю пласта-коллектора зачастую нельзя рассматривать как поверхность, ограничивающую изучаемую гидродинамическую систему. В ходе эксплуатации ПХГ газ может накапливаться в проницаемых интервалах пласта-покрышки, мигрировать в вышележащие горизонты. В большинстве случаев это может быть вызвано техническими причинами, однако возможны и геологические: недостаточные флюидоупорные свойства пластов-перемычек, наличие литологических или тектонических окон, проницаемых тектонических разломов и т.п. Поэтому часто модель ПХГ включает не только модель пласта-коллектора, но и достаточно детальную модель пласта-покрышки или его части. При наличии перетоков газа, как правило, требуется моделирование и пласта-коллектора, и гидродинамически связанных с ним толщ (рис. 4). Кроме того, традиционно объекты ПХГ моделируются до дневной поверхности или приповерхностных отложений (рис. 5). Подобная модель надпродуктивной толщи не используется для гидродинамического моделирования, но служит основой для комплексирования данных, получаемых



**Рис. 3. Схема изученности идеализированного объекта ПХГ со 100%-ной охарактеризованностью скважин данными каротажа: а – пласт-коллектор; б – контрольный горизонт**

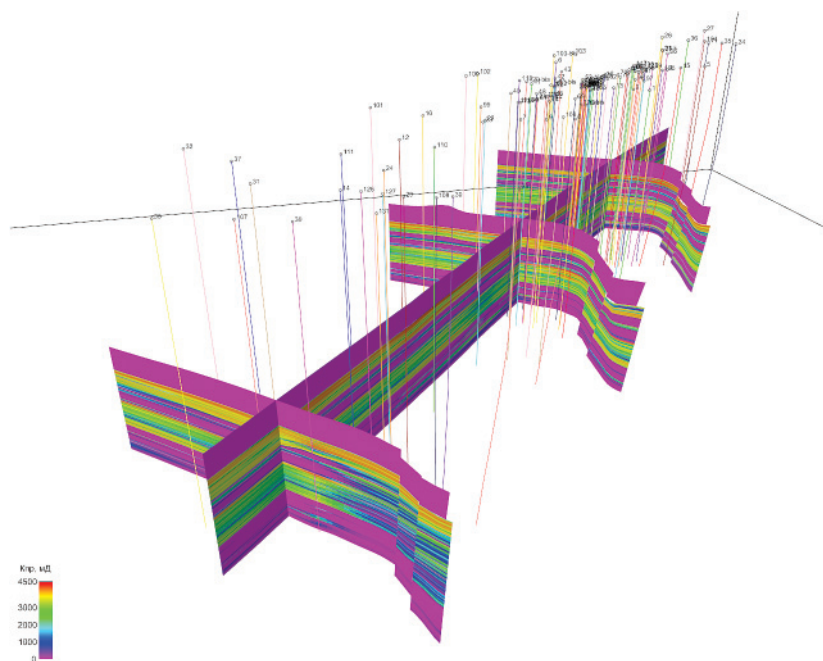


Рис. 4. Пример геологической модели многопластового объекта ПХГ

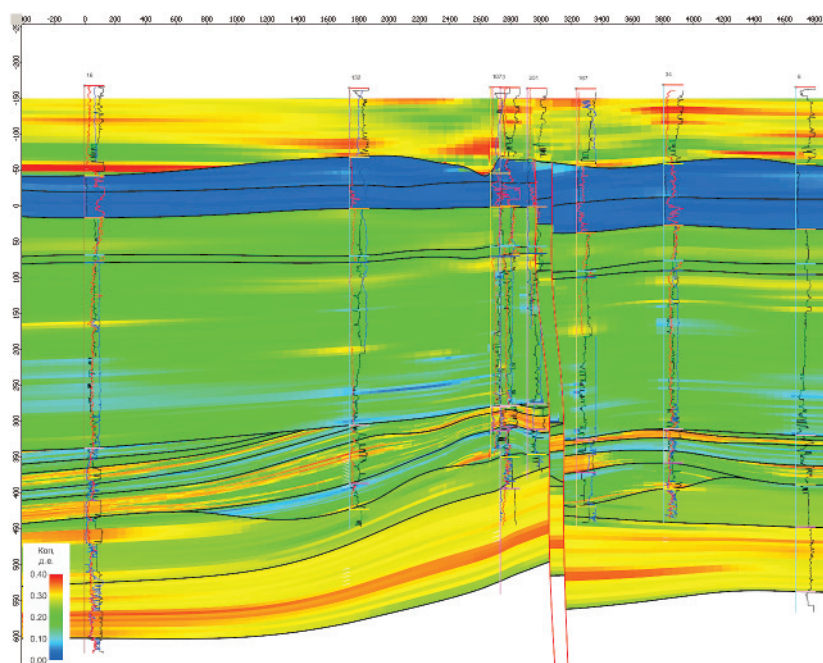


Рис. 5. Пример геологической модели объекта ПХГ, построенной до дневной поверхности. Вертикальный разрез

при объектном мониторинге, и выполнения работ по оценке герметичности;

- *разнонаправленность фильтрационных процессов в пласте*. Если из месторождения происходит только отбор углеводородов, т.е. процесс фильтрации является в целом однонаправленным, то в ПХГ закачка и отбор газа чередуются, иногда с существенными отклонениями

от идеализированного циклического режима. Поскольку объем и конфигурация залежи во многом зависят от принятых режимов и объемов газа, необходимо моделировать пласт в пределах объекта в полном объеме в границах всей структуры до замка, в отдельных случаях (небольшие малоамплитудные структуры) включая в модель и соседние структурные ловушки;

- *противоречивость требований к детальности моделирования.* Поскольку гидродинамическое моделирование ПХГ является сложной ресурсоемкой задачей, детализация геологического моделирования значительно увеличивает вычислительные ресурсы и время, необходимые для проведения расчетов. Таким образом, существует острая потребность максимально возможного снижения детальности трехмерной сетки геологической модели. В то же время имеется целый ряд факторов, требующих увеличения ее детальности. Подобный конфликт интересов делает задачу перемасштабирования трехмерной сетки геологической модели нетривиальной, требующей для каждого объекта ПХГ поиска своего оптимального решения;

- *возможность уточнения представлений о геологическом строении объекта по косвенным данным.* Значительный и постоянно увеличивающийся объем геофизических и промысловых данных, косвенно характеризующих геологическое строение объекта, дает возможность проверять принятые петрофизические характеристики и гипотезы геологического строения объекта по поведению в нем газовой залежи. В отдельных случаях получаемая информация позволяет охарактеризовать участки с недостаточной геолого-геофизической изученностью.

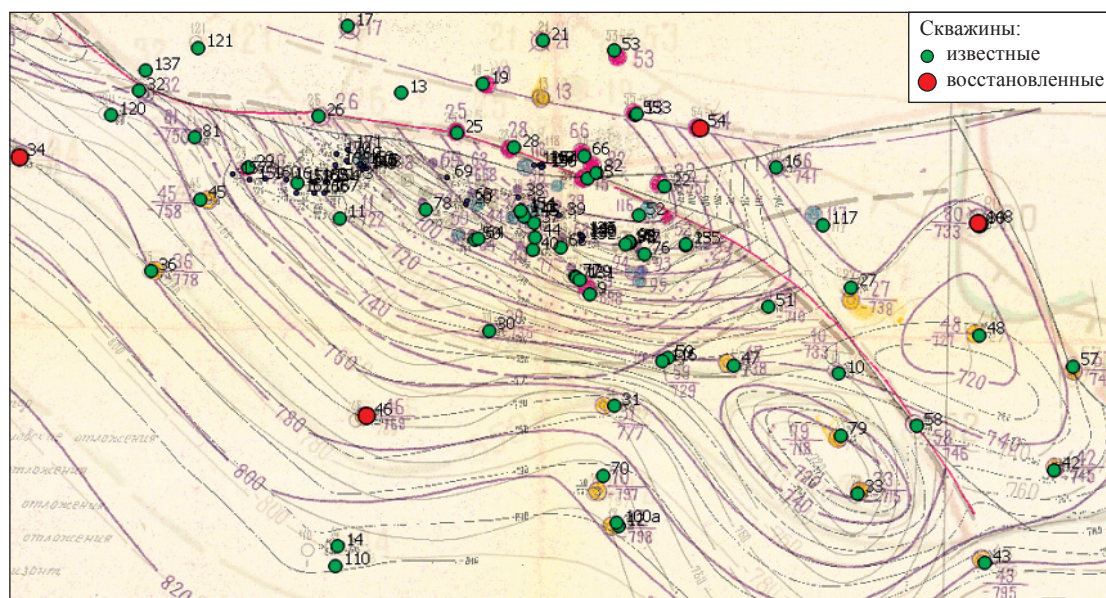
В целом наиболее специфична задача моделирования ПХГ в водоносном пласте, так как аналогичная задача относительно истощенных месторождений намного ближе к традиционному моделированию месторождений.

Остановимся на наиболее критичных факторах, требующих внесения поправок в типовой процесс построения модели. Из-за неполноты исходной геолого-геофизической информации и общей недоизученности объектов ПХГ, создаваемых в водоносных пластах, важной задачей является наиболее полное использование имеющихся данных, для комплексирования которых необходимы их взаимная проверка и увязка. Такие процедуры не являются типовыми для современных продуктов геологического моделирования, традиционно рассчитанных на работу с уже проверенными и взаимосвязанными данными.

Первая задача, решаемая еще до этапа геологического моделирования, – это подготовка пространственных данных. Имеющиеся площадные построения помимо геологических

противоречий зачастую бывают выполнены в различных системах координат и картографических проекциях, опираются на данные ныне ликвидированных скважин, не числящихся на балансе ПХГ. Хотя пакеты программ геологического моделирования могут рассматриваться как специализированные геоинформационные системы, их инструментарий по работе с пространственными данными во многих случаях обнаруживает крайнюю слабость, что делает востребованным применение как полноценных геоинформационных систем общего назначения, например QGIS, так и специализированных, подобных Easy Trace. Это может потребоваться при необходимости пространственной привязки и векторизации архивных материалов, сопоставления и согласования разнородных пространственных данных разных лет и авторов, восстановления местоположения ликвидированных скважин [9] (рис. 6).

Другой задачей, также требующей решения еще до начала непосредственно построения модели, является взаимная проверка и увязка исходных геолого-геофизических данных. Поскольку при геологическом моделировании работа с геолого-геофизическими данными может быть начата лишь после уточнения положений скважин, загрузки их траекторий и т.п., обычно к данному этапу переходят лишь после решения всех проблем, связанных с пространственными данными. Такая подготовка исходных геолого-геофизических данных является ключевой фазой, блокирующей все дальнейшие работы как геологов-моделистов, так и петрофизиков, поэтому на данном этапе бывает эффективна их совместная работа в единой команде. Как и в случае с пространственными данными, пакеты геологического моделирования обычно предоставляют слишком скудные средства для выполнения подобного рода задач. В то же время, полноценная автоматизированная пакетная проверка и подготовка геолого-геофизических данных зачастую выходят даже за рамки инструментария многих традиционных средств подготовки скважинной геофизики, вынуждая использовать специализированные инструменты [10, 11]. Даже визуальная проверка исходных геофизических данных в большинстве современных коммерческих продуктов геологического моделирования реализована крайне слабо. Некоторым исключением здесь является лишь инструментарий отечественного



**Рис. 6. Схема расположения ликвидированных скважин, восстановленная при сопоставлении карт разных авторов за разные годы, приведенных к единой системе координат с помощью пространственной привязки в геоинформационной системе QGIS**

пакета моделирования Dv-Geo [12, 13], что позволяет применять его как систему первичного анализа и подготовки геолого-геофизических данных даже в тех случаях, когда все дальнейшее моделирование выполняется в других программных пакетах (рис. 7, 8).

В случае моделирования крупных и неоднородно изученных объектов на всех этапах моделирования актуальной задачей является обеспечение навигации по таким моделям. Особенно ярко это выражено в отношении моделирования ПХГ в водоносных пластах. В то же время данная проблема все еще крайне слабо проработана в ведущих пакетах геологического моделирования, из-за чего в реальных ситуациях штатные средства навигации по модели оказываются крайне неудобными и непроизводительными. Некоторое исключение составляют отдельные отечественные программные продукты геологического моделирования, в частности уже упомянутый Dv-Geo, однако, если согласно техническому заданию моделирование должно вестись в других пакетах программ, геолог-моделист оказывается наедине с проблемой без каких-либо эффективных средств ее решения. Учитывая, что неоднородность исходных данных характерна не исключительно для ПХГ в водоносном пласте – здесь она лишь выражена в наибольшей степени, вероятно, можно говорить о целесообразности

доработки популярных продуктов геологического моделирования в этом направлении.

Одна из наиболее существенных проблем, с которой приходится сталкиваться при геологическом моделировании ПХГ в водоносном пласте, – корреляция высокоизменячивых толщ в условиях неполного вскрытия пласта. В качестве наглядного примера можно привести объекты хранения газа, созданные в пласте песчаников щигровского горизонта на территории Восточно-Европейской платформы. Продуктивный разрез, как правило, бывает охарактеризован полностью лишь в немногочисленных разведочных или наблюдательных скважинах. Это связано с тем, что из-за технологических особенностей эксплуатации подземных хранилищ большинство эксплуатационных скважин вскрывает только верхнюю часть продуктивного пласта. Для корректного проведения корреляции, как правило, необходимы два репера – в верхней и нижней частях разреза. В неоднородных терригенных разрезах, где вскрытие разреза неполное, при отсутствии нижнего репера корреляция затруднена и во многих случаях неоднозначна.

На рис. 9 показан пример корреляции неоднородного разреза щигровского горизонта, где кровля продуктивного пласта выделяется неоднозначно. Сложность выделения кровли коллекторской пачки связана с уплотнением

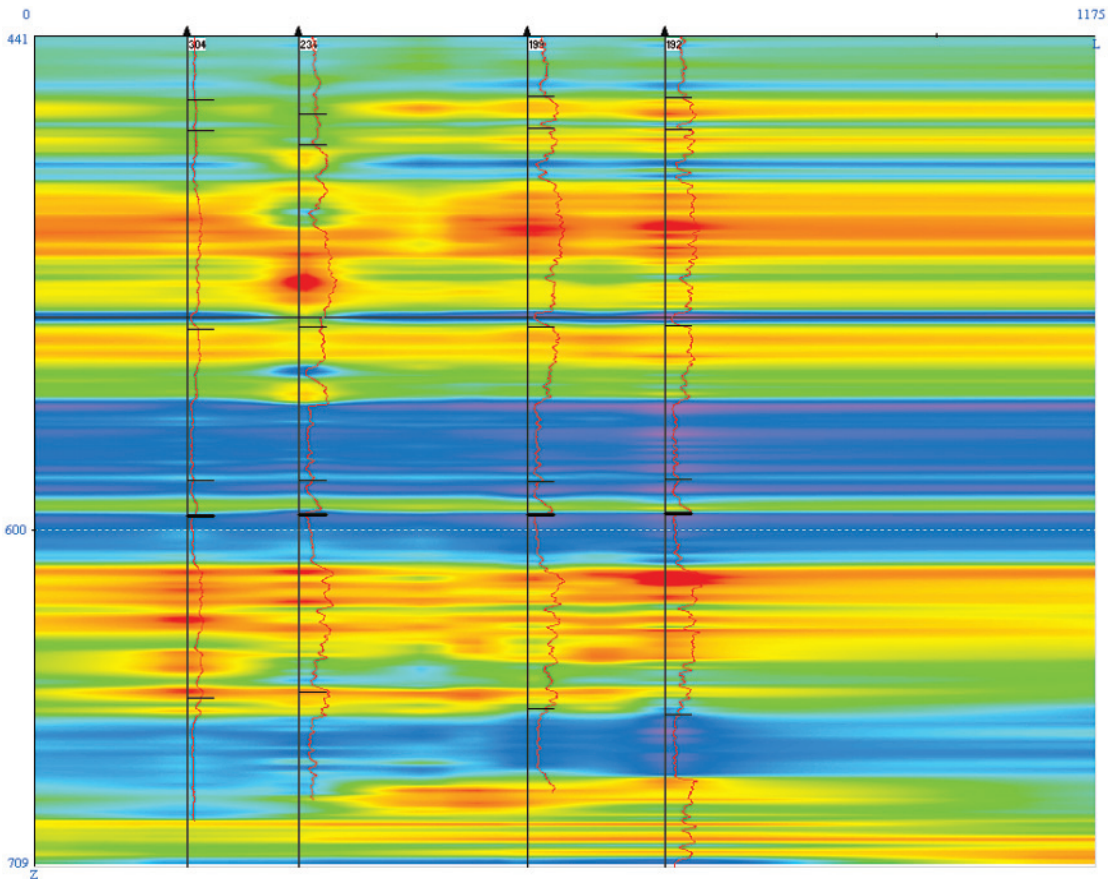


Рис. 7. Выявление «склейки» в записи каротажа (на профиле – вторая слева скважина) при оценке качества исходных данных в визуальной среде Dv-Geo (с использованием традиционных средств выявления подобных дефектов крайне проблематично). Верхняя часть разреза по скважине является не локальной аномалией свойств, а следствием смещения участка исходных материалов

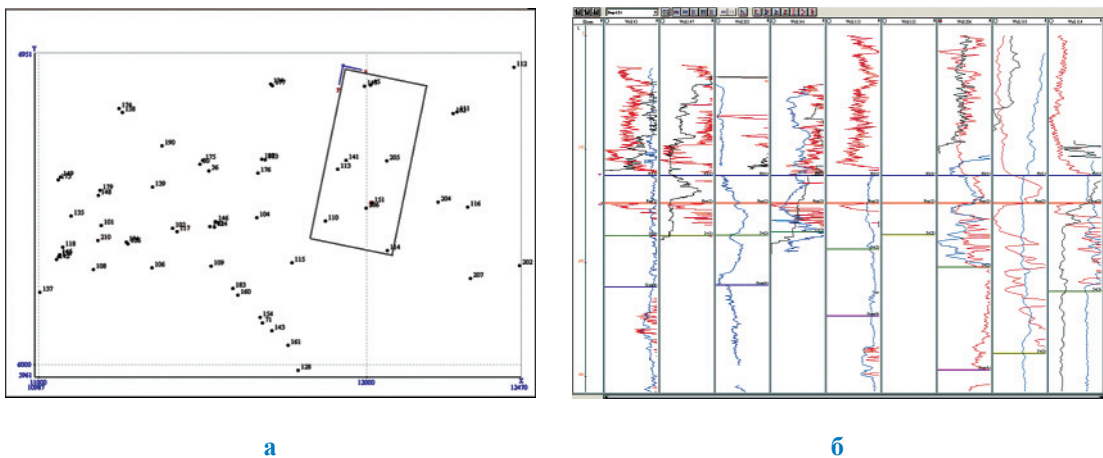


Рис. 8. Проверка и корректировка отбивок в среде Dv-Geo:  
 а – выбор скважин интерактивной рамкой с учетом визуального отображения распределения глубин отбивок; б – схема корреляции, автоматически генерируемая для выбранных скважин

пород в верхней части разреза. Основными реперами являются границы стратиграфических горизонтов – кровли щигровского горизонта и живетского яруса. Скважин, вскрывших эти два репера, мало; немного больше скважин, вскрывших промежуточный репер, разделяющий щигровский горизонт приблизительно на две части; основная же часть скважин – эксплуатационные, находящиеся в кустах и вскрывающие верхнюю часть щигровского разреза (рис. 10).

Корреляция таких разрезов выполняется в несколько этапов. Сначала проводится сопоставление глубоких скважин, вскрывших оба основных репера. В них находят промежуточные реперы. Затем к сопоставлению подключают скважины, вскрывшие эти промежуточные реперы. На последнем этапе проводится уже сопоставление «коротких» скважин. В связи с этим процесс корреляции, как правило, является наиболее трудоемким и его трудно автоматизировать.

Серьезная проблема геологического моделирования – достоверный прогноз пространственного распределения свойств. Многие популярные в настоящее время методы фациального и петрофизического моделирования не приспособлены для работы с сильно неоднородными исходными данными, позволяя с легкостью получить существенно некорректный результат моделирования при полностью корректных исходных данных [2, 8].

В общем виде применяемые к геологическому моделированию подходы делятся на детерминированные и стохастические. Детерминированный подход предлагает одно, наиболее вероятное, решение, в то время как стохастический – набор равновероятных реализаций, ни одной из которых не отдается предпочтения. По принципу работы можно условно выделить «геометрические» методы моделирования, работающие лишь на основе значений исходных данных и их расположения, и статис-

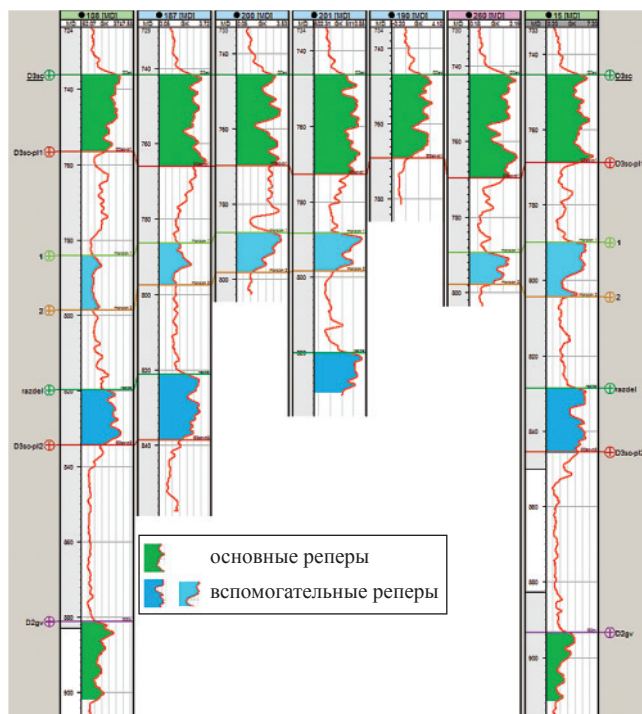


Рис. 9. Корреляция неоднородного разреза щигровского горизонта

тические, основанные на переносе статистических характеристик исходных данных на итоговую модель (таблица). Таким образом, все применяемые методы можно условно представить в виде некоторой матрицы, каждая из ячеек которой будет отражать сочетание данных подходов. Такие методы, как триангуляция, метод ближайшего соседа, сплайновый, конвергентный, метод минимальной кривизны, полиномиальный, являются «геометрическими» детерминированными. Популярным статистическим детерминированным методом интерполяции служит метод Криге (кригинг) и его вариации, статистическим стохастическим – метод последовательной гауссовой симуляции. Кроме того, статистическими являются и многие методы фациального моделирования.

**Классификация распространенных методов геологического моделирования**

МЕТОДЫ	Детерминированные	Стохастические
«Геометрические»	Триангуляция, метод ближайшего соседа, сплайновая интерполяция, конвергентная интерполяция, метод минимальной кривизны, полиномиальный метод	–
Статистические	Метод Криге (кригинг)	Последовательная гауссова симуляция (англ. sequential gaussian simulation, SGS)



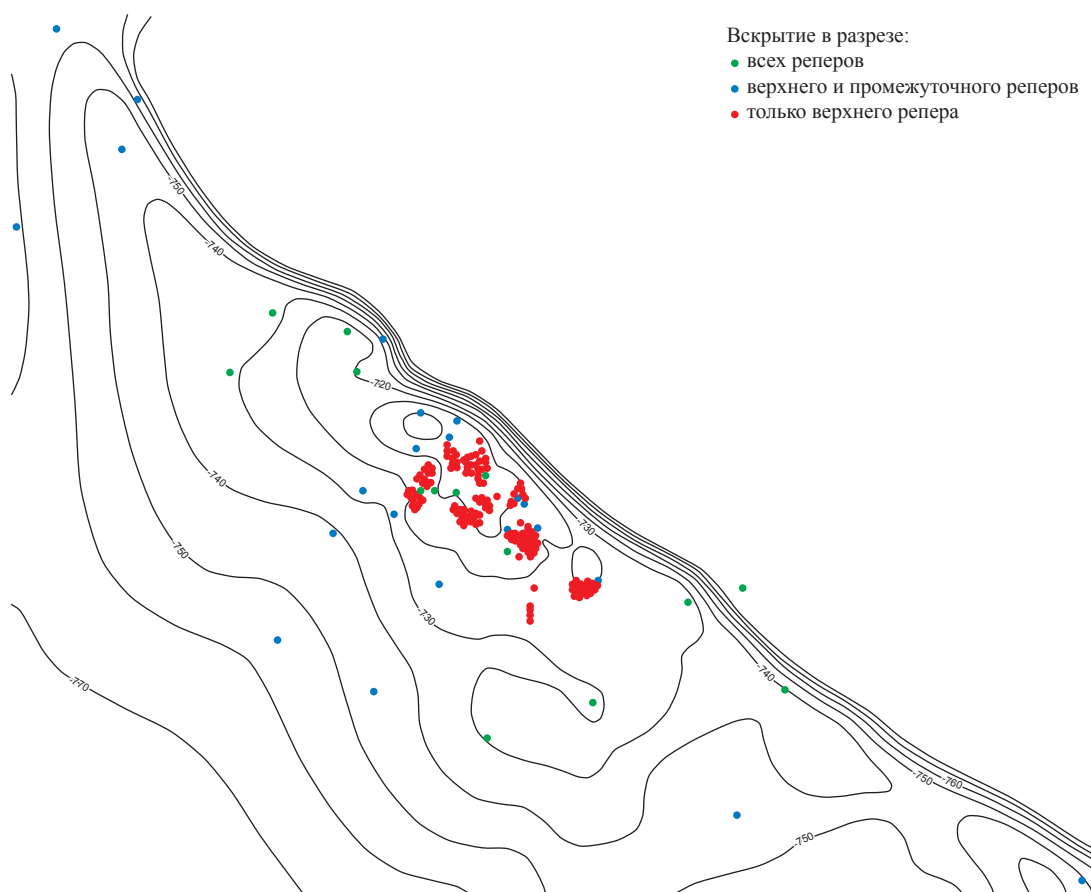
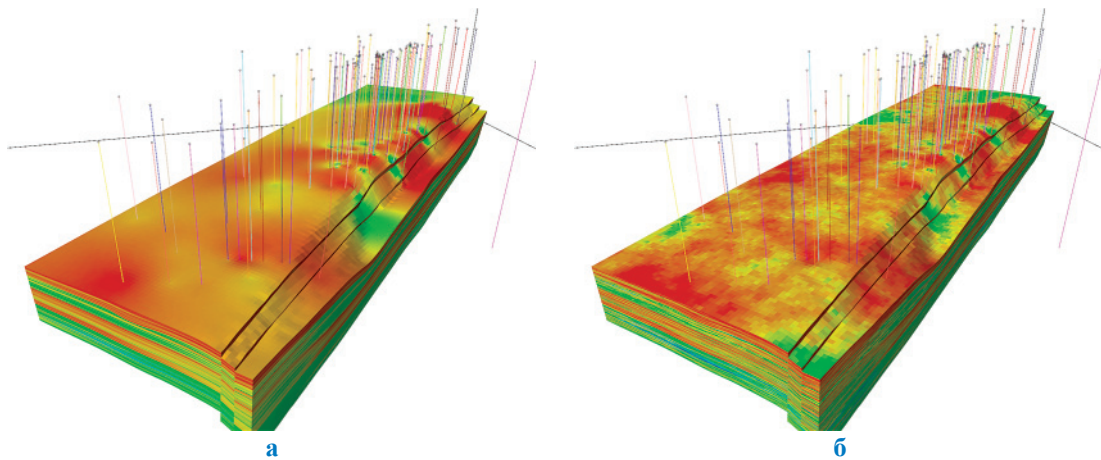


Рис. 10. Площадная неоднородность вскрытия скважинами продуктивного разреза

Детерминированные методы характеризуются разночастотностью получаемых моделей, заключающейся в том, что в области более редкого расположения исходных данных теряется высокочастотная составляющая изменчивости свойств (рис. 11а). Иногда данная особенность приводится в качестве недостатка детерминированного подхода, хотя на практике она, как правило, не вызывает каких-либо существенных негативных последствий.

Среди статистических методов в настоящее время наиболее популярны так называемые «геостатистические», основанные на воспроизведении в модели вариограмм и, в случае стохастического моделирования, общих распределений (гистограмм) исходных данных [14]. Основным ограничением этого подхода является принятие гипотезы стационарности, заключающейся в том, что изучаемая величина в волевом порядке начинает рассматриваться как стационарная случайная функция, а все исходные данные – как принадлежащие ей точки. Характер изменчивости свойств, описываемый автокорреляционной функцией

или вариограммой, априорно принимается одинаковым для всего моделируемого объекта. Помимо принятия гипотезы стационарности, являющейся наиболее уязвимым местом «геостатистических» методов, существует проблема корректного вычисления вариограммы и общего распределения (гистограммы) значений. Именно невозможность корректно вычислить вариограмму зачастую создает основные сложности для корректного использования этих методов при моделировании неоднородно изученных объектов. Несмотря на то что в общем случае методы, основанные на воспроизведении глобальных статистик, слабо приспособлены для работы с неоднородными исходными данными, некоторые ограничения отчасти можно обойти. Например, при невозможности корректного проведения вариограммного анализа из-за неоднородности исходных данных возможно использование радиуса вариограммы, равного половине моделируемого объекта. Существенных ошибок при стохастическом моделировании можно избежать, строго соблюдая выполнение процедуры



**Рис. 11. Результат корректного использования «геостатистических» алгоритмов при геологическом моделировании неоднородно изученных объектов: а – детерминированный подход (кригинг); б – стохастический подход (последовательная гауссова симуляция)**

декластеризации исходных данных при расчете глобальных статистик на всех этапах моделирования (см. рис. 11б). При невозможности корректного расчета глобальных статистик от применения стохастического моделирования следует воздержаться.

В любом случае при использовании автоматизированных методов моделирования необходим жесткий экспертный контроль получаемых результатов. В то же время значительной части проблем можно избежать еще на этапе планирования геологоразведочных работ, если заранее учитывать специфику дальнейшего использования данных при геологическом моделировании.

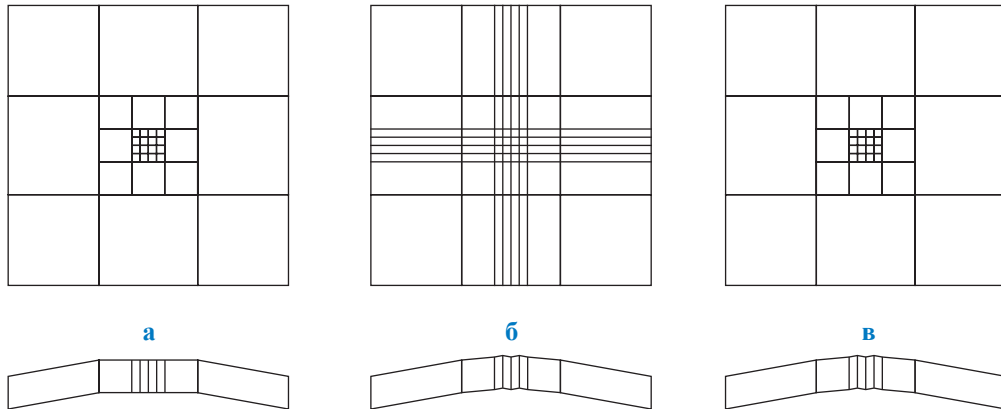
Достаточно остро применительно к моделированию ПХГ стоит проблема баланса между ресурсоемкостью и детальностью модели. Как уже отмечалось, к детальности модели часто предъявляются прямо противоположные требования. С одной стороны, сложность фильтрационных процессов, протекающих на ПХГ, и длительность истории разработки существенно затрудняют процесс адаптации гидродинамических моделей ПХГ, требуя построения геологической модели с наименее возможной детальностью. С другой стороны, существует ряд объективных факторов, требующих увеличения детальности геологической модели. Так, зачастую ПХГ являются сложными многопластовыми системами с крайне высокой плотностью скважин в центральной части, высокой вертикальной и латеральной изменчивостью свойств и негоризонтальным газоводя-

ным контактом (ГВК), не позволяющим применять используемую для месторождений технику оптимизации каркаса модели, при которой ниже уровня ГВК сетка существенно огрубляется. Существующее противоречие требований делает выбор детальности геологической сетки и перемасштабирования геологической модели для экспорта в гидродинамический симулятор нетривиальной задачей, решаемой для каждого ПХГ индивидуально.

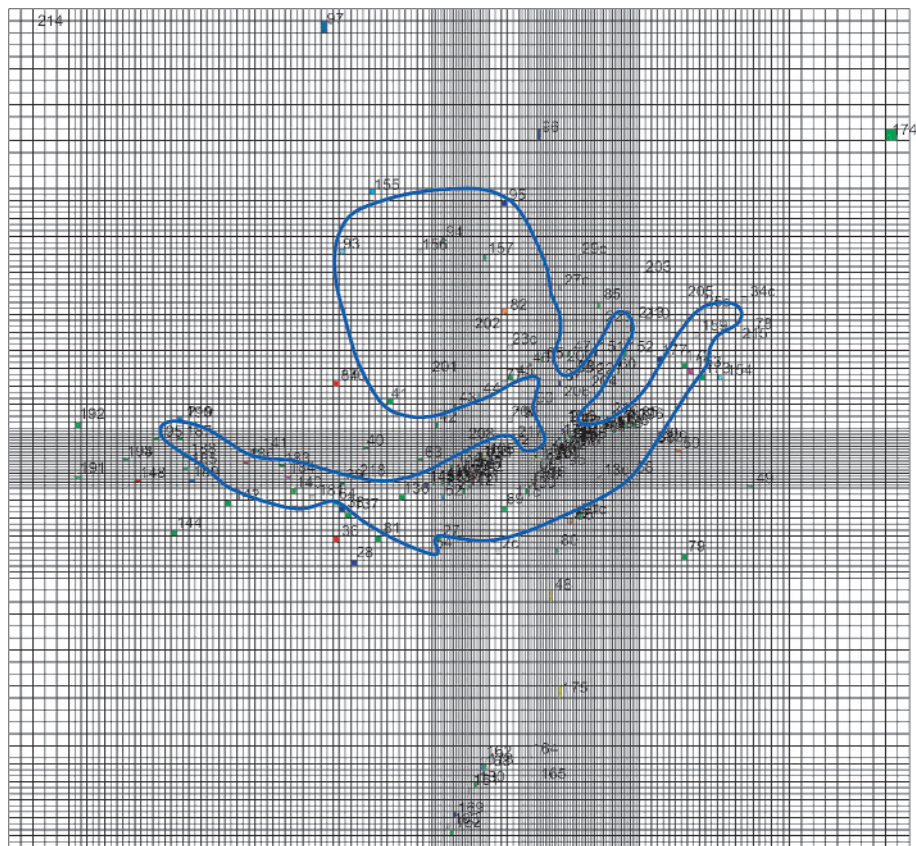
Существуют способы реализации неоднородной структуры каркаса модели с использованием более распространенных средств: вложенных локальных сеток, сеток с неравномерным шагом, сконцентрированных в центральной части модели, а также различных комбинаций этих двух способов. Тем не менее каждый способ имеет существенные ограничения. Так, локальные сетки позволяют передать только распределение свойств, но не хранить пространственную структуру, вписываясь внутрь уже существующих ячеек грубой сетки. Сетки с неравномерным шагом используют значительное количество избыточных ячеек на краях, где подобной детализации не требуется, порождая при этом отдельные ячейки с крайне неодинаковыми по длине сторонами, что может приводить к существенному снижению достоверности решения уравнений фильтрации в таких ячейках. Универсальным вариантом представляется применение полностью нерегулярных сеток, более детальных в хорошо изученных частях и менее детальных в краевых,

слабоизученных, частях, где подобная детальность избыточна (рис. 12). Хотя аналогичные модели в настоящее время поддерживаются многими гидродинамическими симуляторами, инструменты для их создания во многих распространенных продуктах геологического

моделирования все еще не реализованы. В перспективе же использование подобного подхода может быть востребовано не только применительно к версии каркаса, экспортируемого для гидродинамических расчетов, но и при построении основной геологической модели.



**Рис. 12. Способы реализации неоднородной структуры каркаса трехмерной модели на основе вложенных локальных сеток (а), сеток с неравномерным шагом (б), полностью нерегулярных сеток (в): сверху – в плане; внизу – в поперечном сечении**



**Рис. 13. Использование сетки с неравномерным шагом при моделировании ПХГ для уменьшения общего количества ячеек структурного каркаса модели при сохранении его детальности в необходимых областях**

В реальных случаях, когда возможность построения полностью неравномерного каркаса отсутствует, но равномерный оказывается непригоден, требуя либо задания слишком большого количества ячеек, либо слишком существенного огрубления модели, наиболее рациональным оказывается осторожное использование сеток с неравномерным шагом (рис. 13). Основным требованием при подготовке такого каркаса является ограничение предельного соотношения длины и ширины ячеек, поскольку достоверность решаемых уравнений фильтрации для существенно удлиненных ячеек может заметно снижаться. Как правило, используются предельное соотношение 1:2 в границах возможного положения ГВК и соотношение 1:4 по модели в целом. Поскольку возможности такой оптимизации сетки ограничены, для дополнительной экономии ресурсов этот подход нередко применяется совместно с неоднородным шагом по глубине.

Для дальнейшего использования в объектном мониторинге модели ПХГ, в том числе и параметрические, обычно строятся до дневной поверхности. Чтобы снизить общую

ресурсоемкость моделирования и обойти возможные ограничения используемых аппаратных средств, геологические модели продуктивной, надпродуктивной и иногда подстилающей толщ бывает целесообразно выполнять в качестве отдельно создаваемых, но совместно визуализируемых сеток. Это позволяет существенно сэкономить вычислительные ресурсы без каких-либо потерь с точки зрения дальнейшего удобства использования моделей. В гидродинамический симулятор передается, естественно, только модель продуктивного интервала (рис. 14).

Важной проблемой моделирования проницаемых резервуаров служит согласование их геологической и гидродинамической моделей. Как и задача гидродинамического моделирования, задача геологического моделирования обычно имеет несколько корректных решений, иногда существенно различающихся. Вполне корректная с точки зрения геолога геологическая модель может быть малопригодна в качестве основы для дальнейшего гидродинамического расчета, требуя внесения определенных корректировок.

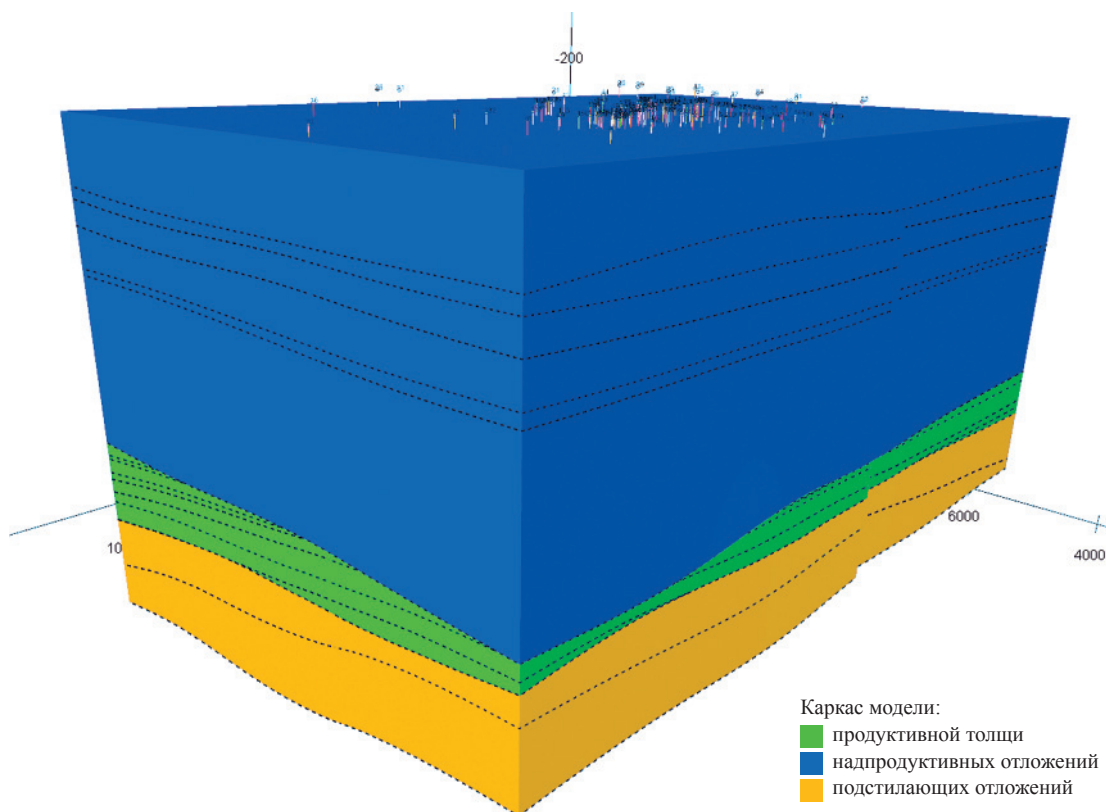


Рис. 14. Геологическая модель объекта ПХГ, выполненная с использованием трех отдельных трехмерных сеток

Чтобы повысить однозначность прогноза и общую достоверность моделирования, необходимо привлечение дополнительной информации, характеризующей моделируемый объект. В случае ПХГ такой информацией является накопленный массив промысловых данных, для которых могут быть выявлены устойчивые тенденции, зависящие от геологических факторов. За счет цикличности эксплуатации ПХГ накапливается большой объем таких данных, благодаря чему появляется возможность проверить и уточнить значения геологических параметров, прямая регистрация которых невозможна или проблематична. Выявление главных факторов неопределенности позволяет экспертным методом согласовать результаты геологического моделирования с промысловыми данными, уточняя геологическую модель при адаптации гидродинамической модели. В данном случае гидродинамическая модель используется как посредник, позволяющий проверять

адекватность геологической модели по промысловым данным и уточнять ее с учетом этих данных. Как результат, помимо построения корректной гидродинамической модели также повышается достоверность геологического моделирования [8, 15, 16].

\*\*\*

Таким образом, несмотря на то что вопросы автоматизированного построения геологических моделей, наилучшим образом интерпретирующих имеющиеся геолого-геофизические и промысловые данные, остаются открытыми, уже сейчас задача построения приемлемо достоверной модели ПХГ в принципе может быть решена. В будущем с внедрением в повседневную практику прогрессивных методов математической геологии необходимость применения экспертного подхода в моделировании, вероятно, удастся снизить.

### Список литературы

1. Дегтерёв А.Ю. Актуальные методы геологического моделирования ПХГ / А.Ю. Дегтерёв // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. – С. 112–122.
2. Дегтерёв А.Ю. Количественная оценка достоверности геологического моделирования в условиях нестационарности геостатистических характеристик геологической среды / А.Ю. Дегтерёв // М-лы II Науч.-практ. конф. «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность». – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010.
3. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газовых месторождений. Ч. 1: Геологические модели. – М.: ВНИИОЭНГ, 2003. – 164 с.
4. РД 153-39.0-047-00. Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. – М.: Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, 2000.
5. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом. – М.: ВНИГНИ; Тверь: НПЦ «Тверьгеофизика», 2003.
6. Закревский К.Е. Геологическое моделирование 3D / К.Е. Закревский. – М.: ИПЦ «Маска», 2009. – 376 с.
7. Закревский К.Е. Оценка качества 3D моделей / К.Е. Закревский, Д.М. Майсюк, В.Р. Сыртланов. – М.: ИПЦ «Маска», 2008. – 272 с.
8. Дегтерёв А.Ю. Проблемы достоверности моделирования неоднородно изученных геологических объектов / А.Ю. Дегтерёв, В.Е. Кан // М-лы III Междунар. науч.-практ. конф. и выставки «Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения» (WGRR-2013). – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013.
9. Дегтерёв А.Ю. Применение геoinформационного подхода при геологическом моделировании подземных хранилищ газа / А.Ю. Дегтерёв // М-лы XI Всеросс. науч.-практ. конф. «Геoinформатика в нефтегазовой отрасли». – М., 2010.
10. Матушкин М.Б. Пакетная обработка геолого-геофизических данных для создания геолого-технологической модели / М.Б. Матушкин, А.Г. Черников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 12.

11. Матушкин М.Б. Создание петрофизических моделей пластовых систем на основе нелинейного марковского прогнозирования / М.Б. Матушкин, А.Г. Черников // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 5. – С. 33–37.
12. Ларин Г.В. Современные отечественные программные средства изучения нефтегазового месторождения / Г.В. Ларин // Аналитик-2009: сб. науч.-техн. обзоров. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. – С. 167–199.
13. Кашик А.С. Система геологического моделирования Dv-Geo как пример российского инновационного бизнеса / А.С. Кашик, Г.Н. Гогоненков, С.И. Билибин и др. // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – № 5. – С. 11–15.
14. Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика / Е.А. Савельева, В.В. Демьянов. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
15. Темиргалеев Р.Г. Опыт моделирования сложнопостроенного геологического объекта ПХГ, созданного в водоносном пласте / Р.Г. Темиргалеев, А.Я. Исхаков, А.Г. Черников и др. // Подземное хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: сб. науч. тр. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 247–254.
16. Дегтерёв А.Ю. Контроль факторов геологической неопределенности при моделировании ПХГ / А.Ю. Дегтерёв, А.В. Гришин, В.Е. Кан // М-лы III Междунар. науч.-практ. конф. «Подземное хранение газа: надежность и эффективность» (UGS-2011). – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011.