

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
МГРИ-РГГРУ имени Серго Орджоникидзе

На правах рукописи

ДЕГТЕРЁВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И КОМПЛЕКСНОЕ ГЕОЛОГО-ГЕФИЗИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА В ВОДОНОСНОМ
ПЛАСТЕ**

Специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель, д.т.н., профессор В.С. Афанасьев

Москва, 2016г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ТРЁХМЕРНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО И КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПХГ	17
1.1 Типовая последовательность и методические подходы к построению геологической модели.....	20
1.2 Принципы разработки и распространения программных продуктов	50
1.2.1. Место свободного ПО в современном мире.....	53
1.2.2. Концепция СПО с экономической точки зрения.....	64
1.2.3. Риски, связанные с использованием несвободного ПО	65
1.2.4. Риски, связанные с использованием свободного ПО.....	68
1.3 Возможность создания свободной геолого-геофизической программной платформы.....	70
ГЛАВА 2. СПЕЦИФИКА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА, КАК МОДЕЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ.....	78
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПХГ.....	92
3.1 Методы подготовки пространственных данных при геологическом моделировании ПХГ	92
3.2 Методы подготовки скважинных данных, выполнения межскважинной корреляции и структурного моделирования.....	95
3.3 Методы организации технологических процессов петрофизического моделирования....	107
3.4 Методы получения количественных оценок на основе скважинных данных ПХГ и оценки достоверности результатов моделирования	123
3.4.1. Количественная оценка результатов перемасштабирования скважинных данных на ячейки сетки модели.....	128
3.4.2. Количественная оценка результатов перемасштабирования параметров геологической модели на укрупнённую сетку гидродинамической модели.....	128

3.4.3. Количественная оценка результатов геологического моделирования по скважинным данным	130
3.5 Методы моделирования распределения свойств в пространстве	139
3.6 Методы ремасштабирования модели для гидродинамического моделирования.....	148
3.7 Методы снижения неопределённости моделирования, использования и уточнения моделей	151
3.8 Требования к программному продукту геологического моделирования ПХГ	152
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПХГ	156
4.1 Комплексирование геологической и геофизической информации на основе геологической модели ПХГ	157
4.2 Комплексирование геологической, геофизической и промысловой информации в единой интерполяционной предсказательной модели ПХГ	166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	181
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	183

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГВК – газоводяной контакт

ГИС – геофизические исследования скважин

ГДИС – гидродинамические исследования скважин

ДЗЗ, данные ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли, данные дистанционного зондирования Земли

ЗСБ – зондирование становлением поля в ближней зоне

ИННК – импульсный нейтрон-нейтронный каротаж

ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства

МОГТ – метод общей глубинной точки

НГК – нейтронный гамма-каротаж

ОС – операционная система

ПДГТМ ПХГ – постоянно действующая геолого-технологическая модель ПХГ

ПО – программное обеспечение

ПХГ, объект ПХГ – подземное хранилище газа, объект подземного хранения газа

РИГИС – результаты интерпретации геофизических исследований в скважинах

СПО – свободное ПО

ЭВМ – электронная вычислительная машина

NTG – Net to Gross – доля коллекторов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Газовая отрасль в целом и экспорт газа в частности являются одними из основных статей дохода Российской Федерации, от их результатов в значительной степени зависит бюджет страны и, как следствие, стабильность внутренней экономической обстановки и непосредственно благосостояние граждан. Кроме того, газ необходим для внутреннего потребления крупными городами и промышленными центрами. При этом, как внешний, так и внутренний спрос на газ имеет неравномерность, связанную как с сезонными изменениями температур, так с погодными аномалиями и внутрисуточной неоднородностью потребления. Для обеспечения возможности своевременного и полного исполнения договорных обязательств по экспортным поставкам газа необходимо иметь оперативные резервы, пригодные для покрытия сезонной и пиковой неоднородности спроса на газ. В настоящее время основным способом компенсации различных форм неоднородности газопотребления является закачка излишков газа в подземные хранилища газа и последующий его отбор при возникновении необходимости (Рисунок 1).

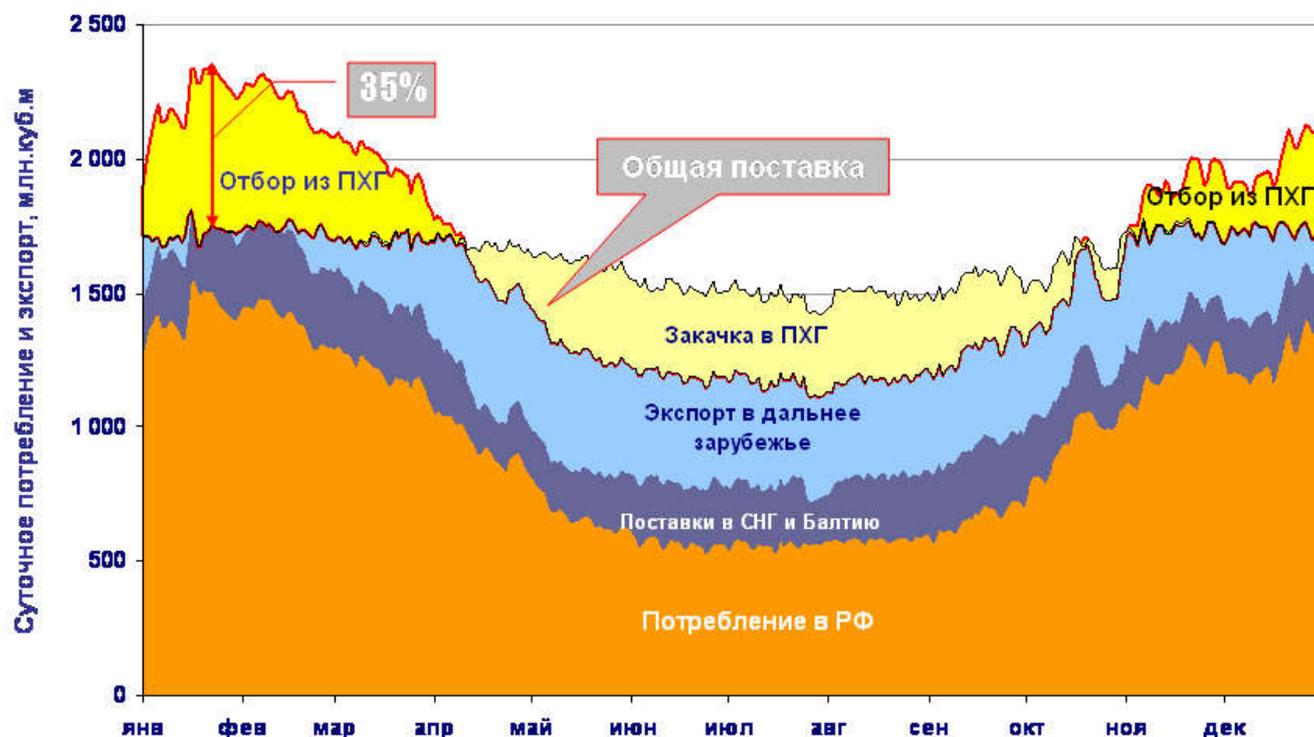


Рисунок 1 – Роль газа из ПХГ в компенсации общей неравномерности газопотребления России

Подземные хранилища газа (ПХГ) являются геолого-технологическими объектами, которые, помимо компенсации сезонной и суточной неравномерности газопотребления, используются для накопления и хранения стратегических резервов газа, временного хранения попутного нефтяного газа. Помимо хранения углеводородных газов, ПХГ могут использоваться

для хранения газов неуглеводородного состава, например, гелиевого концентрата. Наиболее распространёнными в мире типами объектов ПХГ являются подземные хранилища в водоносном пласте, в истощённом месторождении и в солевых кавернах. В России наиболее распространены ПХГ в истощённых месторождениях и в водоносных пластах.

В настоящее время значительная часть задач создания и эксплуатации подземных хранилища газа (ПХГ) решается с использованием методов математического моделирования. Поскольку от используемых моделей зависит принятие технологических, экономических, а иногда и политических решений, существенным вопросом является степень их корректности, то есть соответствия моделей моделируемому объекту. Хотя отдельные задачи в упрощённом, схематичном виде могут быть решены аналитически, значительная часть реальных прикладных задач моделирования ПХГ в истощённых месторождениях и в водоносных пластах требует учёта множества взаимосвязанных факторов и аналитического решения не имеет. В настоящее время такие задачи, как правило, решаются с использованием гидродинамических моделей ПХГ, создаваемых на основе геологических моделей (Рисунок 2), либо, в отдельных случаях – на основе геологических моделей напрямую. В целом, типовая последовательность операций для получения гидродинамической модели ПХГ аналогична последовательности моделирования нефтегазового месторождения и включает последовательное построение трёх взаимоувязанных моделей: петрофизической, геологической и фильтрационной (гидродинамической). Результаты каждого из этапов моделирования используются на следующем этапе в качестве исходных данных. Для построения каждой из моделей требуется применение специализированных методик и программных продуктов.

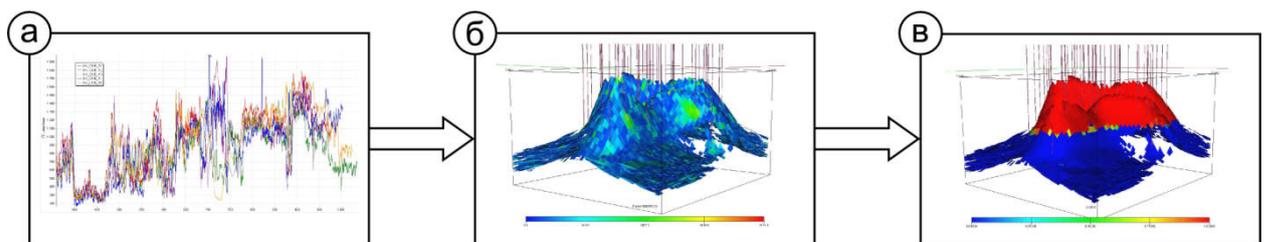


Рисунок 2 – типовая последовательность моделирования: а – петрофизическая модель, б – геологическая модель, в – гидродинамическая модель

Принципиальной особенностью такого подхода является существенное влияние используемой геологической модели на результаты гидродинамического моделирования. В связи с этим, корректность решений, принимаемых на основе гидродинамической модели, в значительной степени зависит от корректности используемой геологической модели. При использовании геологической модели напрямую (например, при решении задач оценки объёмов ловушки, анализа герметичности объекта и т. п.) корректность принимаемых решений напрямую зависит от корректности применявшихся геологических построений. Таким образом,

в любом случае, как при использовании результатов гидродинамического моделирования, так и непосредственно геологического моделирования, корректность используемой геологической модели имеет существенную важность. Вместе с тем, методические основы геологического моделирования объектов ПХГ до настоящего времени остаются практически не проработанными.

Из-за схожести задач моделирования объектов ПХГ в истощённых месторождениях и в водоносных пластах с задачей моделирования нефтегазовых месторождений, для моделирования ПХГ традиционно использовались и используются в те же программные продукты, что и для моделирования нефтегазовых месторождений. Соответственно, при использовании тех же программных продуктов предлагаются те же методики и инструменты моделирования, что и для нефтегазовых месторождений, и, хотя и с некоторыми оговорками, те же нормативные и методические руководства. Специализированная литература по геологическому моделированию ПХГ отсутствует, в то время как применяемые методические и регламентные документы [1, 2, 3] и существующая учебная литература [15, 43, 42], написанные для месторождений, не рассматривают вопросы моделирования ПХГ. Хотя за более чем полувековую историю развития подотрасли подземного хранения газа [76] большинство аспектов изучения, технологического проектирования и гидродинамического моделирования ПХГ были детально проработаны [61, 39, 66], методические вопросы их геологического моделирования до настоящего времени остаются неизученными. Существующие исследования, затрагивающие вопросы контроля эксплуатации ПХГ [70] и оценки их герметичности на основе комплексирования геолого-геофизической и промысловой информации с использованием геологической модели объекта [47] не рассматривают собственно специфику задачи геологического моделирования ПХГ, предполагая наличие некоторой уже готовой геологической модели. Аналогично обстоит ситуация и в работах, посвящённых мониторингу эксплуатации ПХГ, вопросам аналитического контроля объёмов газа в пластах-коллекторах ПХГ [65], прогнозирования и регулирования их эксплуатации [14]. Работы, рассматривающие возможность доизучения геологического строения пластов-коллекторов ПХГ на основе анализа истории его осадконакопления [18, 19] не касаются методов геологического моделирования. Работы, показывающие возможность корректировки распределения ФЕС пласта-коллектора ПХГ по промысловым данным, рассматривают задачу геологического моделирования в крайне упрощённой двухмерной постановке [53, 54]. Работы, рассматривающие задачи совершенствования методик геологического моделирования нефтегазовых объектов и построение соответствующих программных систем, рассмотрение проблематики ведётся на основе рассмотрения задачи моделирования нефтегазовых месторождений [69, 11]. Даже в работах, так или иначе, непосредственно затрагивающих темы, связанные с геологическим

моделированием ПХГ [40, 37, 44], вопросы, касающиеся специфики применяемых для моделирования математических методов или общей методологии моделирования, не рассматриваются.

Вместе с тем, многолетняя практика моделирования ПХГ позволила выявить ряд специфических моментов, отличающих моделирование ПХГ от моделирования нефтегазовых месторождений, и требующих внесения корректировок в применяемые методики и программные продукты [35]. Длительность истории эксплуатации многих ПХГ и накапливаемой при этом промысловой и геофизической информации, характеризующей фильтрационные процессы, протекающие в пласте, существенным образом увеличивают роль фильтрационного моделирования, как инструмента изучения и контроля достоверности геологического строения объекта, а также возможности проверки получаемых моделей по геофизическим данным. В то же время, цикличность эксплуатации объектов ПХГ, при которых в большинстве случаев система проходит состояния в том или иной форме уже наблюдавшиеся в накопленной истории, потенциально позволяет решить задачу моделирования такой системы с принципиально иными способами, возможность применения которых в случае моделирования месторождений отсутствует [34, 80]. В перспективе это позволяет повысить общую достоверность моделирования, отказавшись от традиционной для моделирования нефтегазовых месторождений последовательной схемы построения петрофизической, геологической и гидродинамической моделей вынуждающей выполнять их уточнение итерационно силами команд разнопрофильных специалистов. С другой стороны, использование принципиально отличающегося подхода требует разработки новой методологической и программной базы, поскольку необходимая функциональность не может быть реализована на базе уже существующих программных продуктов геологического или гидродинамического моделирования. В то же время, существуют способы привлечения результатов текущих геофизических исследований, выполняемых на ПХГ для повышения достоверности геологического моделирования и выполнения аналитических работ даже в рамках традиционного подхода к моделированию.

Рассмотренные проблемы носят разнородный характер, однако в целом взаимосвязаны, поэтому требуют систематизации и комплексного изложения. К настоящему времени автором опубликован ряд работ, посвящённых данной проблеме, на ведущих тематических конференциях неоднократно делались доклады по данной тематике, однако формат данных работ позволяет осветить в каждом отдельном случае лишь отдельную проблему, либо лишь тезисно перечислить их. Вместе с тем, исследования по данной проблеме в целом завершены и требуют систематизированного изложения, чему и посвящена в целом данная работа. Поскольку, как будет показано в главе 2, все специфические черты ПХГ наиболее полно

проявляются у объектов ПХГ в водоносном пласте, именно данный тип объектов ПХГ был выбран в качестве объекта исследования.

Большой вклад в развитие теоретических основ и практики геологического моделирования внесли Ампилов Ю.П., Аронов В.И., Вистелиус А.Б., Жардецкий А.В., Закревский К.Е., Каждан А.Б., Ковалевский Е.В., Пахомов В.И., Черников А.Г. Dubrule O, Journel A.G., Krige D.G., Matheron G. и др.

Геологическое моделирование является синтетической областью знаний, находящейся на стыке нескольких научных специальностей. В случае задачи геологического моделирования ПХГ, решаемые подзадачи, согласно паспортам соответствующих специальностей ВАК, принадлежат в первую очередь к областям исследований, относящимся к следующим научным специальностям:

- **25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»:**
 - п.16** – Использование геолого-геофизических данных для построения геологических, гидродинамических и геодинамических моделей месторождений,
 - п.17** – Мониторинг геологического строения и разработки месторождений геофизическими методами
 - п.18** – Интегрированный анализ многомерной, многопараметровой и разнородной информации, включающей геофизические данные
 - п.24** – Контроль разработки месторождений полезных ископаемых по данным наземных и скважинных геофизических исследований
- **05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:**
 - п.1** – Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений
 - п.3** – Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий
 - п.5** – Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента
 - п.8** – Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования
- **25.00.35 «Геоинформатика»:**
 - п.1** – Теоретические и экспериментальные исследования в области развития научных и методических основ геоинформатики

- п.6 – Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС
- п.7 – Геоинформационное картографирование и другие виды гео моделирования, системный анализ многоуровневой и разнородной геоинформации
- **25.00.12 «Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений»:**
 - п.2 – Прогнозирование, поиски, разведка и геолого-экономическая оценка месторождений
 - п.3 – Геологическое обеспечение разработки нефтяных и газовых месторождений
- **25.00.17 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»:**
 - п.3 – Научные аспекты и средства обеспечения системного комплексного (мультидисциплинарного) проектирования и мониторинга процессов разработки месторождений углеводородов, эксплуатации подземных хранилищ газа, создаваемых в истощенных месторождениях и водонасыщенных пластах с целью рационального недропользования
 - п.5 – Научные основы компьютерных технологий проектирования, исследования, эксплуатации, контроля и управления природно-техногенными системами, формируемыми для извлечения углеводородов из недр или их хранения в недрах с целью эффективного использования методов и средств информационных технологий, включая имитационное моделирование геологических объектов, систем выработки запасов углеводородов и геолого-технологических процессов

Поскольку предлагаемое исследование в значительной степени было ориентировано на решение задач, в наибольшей степени принадлежащих к областям исследований, относящихся к специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», в данном случае задача геологического моделирования рассматривалась как относящаяся к данной специальности.

Основой диссертационной работы послужили результаты теоретических, экспериментальных и производственных работ, выполнявшихся автором в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в рамках договоров по геологическому моделированию, технологическому проектированию и объективному мониторингу ПХГ России, Республики Беларусь, Республики Казахстан, стран Европы и КНР.

Цель диссертационной работы – повышение достоверности технологического проектирования и объективного мониторинга эксплуатации объектов ПХГ в водоносных пластах и в истощенных месторождениях на основе научного обоснования и создания технологии

геологического моделирования ПХГ, базирующейся на комплексном учете специфики функционирования ПХГ и особенностей информации, накапливаемой в ходе их эксплуатации.

Основные задачи исследований:

Систематизация аспектов геологического моделирования, специфичных для ПХГ, анализ применимости существующих методик и инструментов геологического моделирования для решения данной задачи. Разработка технологии геологического моделирования ПХГ, удовлетворяющей выявленным требованиям и учитывающей возможности существующих программных средств. Обоснование технологии построения комплексных геолого-геофизических моделей.

Методы исследования:

1. Обобщение и анализ отечественного и международного опыта геологического моделирования ПХГ, существующих научных, нормативных и методических публикаций.

2. Анализ современного состояния и динамики развития рынка геолого-геофизического программного обеспечения, форм лицензирования программных продуктов, перспектив построения программной платформы моделирования ПХГ на базе свободных (некоммерческих) программных продуктов.

3. Анализ геолого-технологических особенностей объектов ПХГ в водоносных пластах, на примере объектов России и ближайшего зарубежья, с целью выявления наиболее существенных факторов, влияющих на достоверность и технологичность процесса их геологического моделирования.

4. Математическое (аналитическое и численное) моделирование процедур, реализованных в типовых программных продуктах геологического моделирования месторождений с целью оценки их применимости для геологического моделирования ПХГ, и разработка методики геологического моделирования ПХГ на основе реализованного в них инструментария.

5. Разработка комплекса методических приёмов решения основных специфических проблем геологического моделирования ПХГ в водоносных пластах и перечня специфических требований к программному продукту геологического моделирования ПХГ.

6. Анализ методов учёта результатов геофизического и промыслового мониторинга эксплуатации ПХГ, ограничений традиционного подхода к построению геолого-технологической модели ПХГ и способов обобщения получаемых данных на основе геологической модели. Теоретическое обоснование возможности построения модели ПХГ, учитывающей весь объём имеющихся геолого-геофизических и промысловых данных по объекту, реализованной на принципах интерполяционного предсказательного моделирования.

7. Опробование разработанной технологии при создании геологических моделей ПХГ на территории РФ.

Научная новизна работы

- Впервые геологическое моделирование ПХГ в водоносном пласте рассмотрено в качестве самостоятельной задачи, систематизированы специфические аспекты геологического моделирования ПХГ. Предложенная систематизация легла в основу разработанного автором перечня методических приёмов, повышающих эффективность геологического моделирования ПХГ;

- На примере объектов ПХГ в водоносных пластах рассмотрен вопрос применимости процедур геологического моделирования и количественной оценки достоверности моделирования на основе групповых статистик. Автором впервые обоснована применимость процедур количественной оценки на различных этапах построения геологической модели;

- Обоснована применимость процедур геологического моделирования в условиях неоднородности исходных данных;

- Впервые предложен критерий оценки неоднородности изученности объекта, позволяющий оценить применимость традиционного инструментария моделирования, не учитывающего неоднородность пространственного распределения исходных данных;

- Предложены принципы построения комплексной геолого-геофизической модели ПХГ, учитывающей как геолого-геофизические данные, характеризующие первоначальное геологическое строение объекта ПХГ, так и массив накапливаемых при его эксплуатации данных ГИС-контроль и промысловых данных.

Основные защищаемые положения:

1. Достоверное геологическое моделирование ПХГ в водоносном пласте с использованием программных средств геологического моделирования, разработанных для нефтегазовых месторождений, требует использования комплекса методик моделирования, учитывающих специфику ПХГ как моделируемого объекта и особенности работы применяемых программных инструментов в условиях ПХГ.

2. Корректность работы методов прогноза пространственного распределения свойств и оценки достоверности моделирования ПХГ может быть обеспечена выполнением процедуры декластеризации данных на всех этапах расчёта групповых статистик и отказом от использования процедур, где такая корректировка не может быть выполнена, при этом степень неоднородности данных, и, соответственно, необходимость её учёта, может быть оценена на основе предложенного автором критерия кластеризации.

3. Способы комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ на основе первичных данных и результатов текущих геофизических исследований, позволяющие воспроизводить распределение газонасыщенности пласта-коллектора и контрольных горизонтов и его динамику.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании методов, применяемых для геологического моделирования ПХГ, а также обосновании возможности применения интерполяционного предсказательного моделирования для построения комплексных геолого-геофизических моделей ПХГ. Решение задачи комплексного обоснования применимости существующих методов прогноза свойств и оценки результатов моделирования в условиях пространственной неоднородности исходных геолого-геофизических данных представляет теоретический интерес в рамках совершенствования математического аппарата геологического прогноза в самой широкой постановке задачи. Обоснованная автором диссертации возможность построения геолого-геофизической модели ПХГ на основе интерполяционного предсказательного моделирования, является первым случаем применения данного подхода для моделирования локальных геологических объектов, что в случае дальнейшего развития данного подхода позволит рассматривать ПХГ в качестве одного из эталонных объектов при сопоставлении эффективности различных алгоритмов прогноза.

Достоверность научных положений работы подтверждена разработанными автором концептуальными и математическими моделями и результатами использования предлагаемых методик при моделировании более 10 отечественных и зарубежных объектов ПХГ, создаваемых и эксплуатируемых в различных геологических условиях. Корректность и эффективность предлагаемых методик и подходов подтверждена путем сопоставления полученных моделей с фактическими данными эксплуатации ПХГ по результатам гидродинамического моделирования и текущих геофизических исследований, а также успешным применением этих моделей для решения различных научных и практических задач в рамках технологического проектирования и объектного мониторинга ПХГ.

Практическая значимость результатов работы

В настоящее время значительная часть технологических, экономических, а иногда и политических решений, связанных с созданием и эксплуатацией объектов ПХГ, принимается на основе результатов их геолого-технологического моделирования, в связи с чем важной задачей является обеспечение корректности используемых моделей. Геолого-технологические модели активно используются при решении задач технологического проектирования и объектного

мониторинга эксплуатации ПХГ, на их основе рассчитывается распределение газа в пласте в ходе эксплуатации хранилища, оценивается эффективность различных режимов эксплуатации, разрабатываются различные долговременные сценарии функционирования объекта, такие модели являются ключевым элементом построения автоматизированных систем управления ПХГ, известных как «Интеллектуальные ПХГ».

Понятие «геолого-технологическая модель» подразумевает систему из взаимоувязанных геологической и гидродинамической моделей объекта. Поскольку результаты геологического моделирования в данном случае выступают в качестве основы для гидродинамических расчётов, важной практической задачей является обеспечение достоверности используемой геологической модели. Хотя задача геологического моделирования в общем случае имеет множество решений и несёт те или иные субъективные черты, в ряде случаев существует возможность уменьшить влияние негативных факторов, снижающих общую корректность получаемой геологической модели. Предлагаемая в работе технология направлена на повышение достоверности и технологичности геологического моделирования ПХГ в водоносном пласте, при этом отдельные её элементы могут быть использованы при моделировании ПХГ в истощенных месторождениях, а также нефтегазовых месторождений и других природных объектов. В ходе работы подтверждена принципиальная возможность построения корректной геологической модели ПХГ с использованием инструментов, реализованных в существующих на рынке программных продуктах геологического моделирования нефтегазовых месторождений. Разработан перечень требований к программному продукту геологического моделирования, необходимых для обеспечения эффективного процесса геологического моделирования ПХГ.

Практическая значимость рассмотренной в работе задачи комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ, связана с необходимостью получения более полной и достоверной информации о процессах, происходящих в ходе эксплуатации объектов ПХГ в водоносных пластах, за счёт использования массива накапливаемых в ходе эксплуатации ПХГ геофизических и промысловых данных. Решение данной задачи направлено на упрощение получения корректных симуляционных гидродинамических моделей ПХГ и повышение их достоверности.

Область применения результатов

Результаты работы могут применяться при геологическом моделировании и экспертизе геологических моделей объектов ПХГ в водоносных пластах. Часть предлагаемых методов может быть использована для повышения достоверности геологического моделирования и

экспертизы моделей нефтегазовых месторождений и ПХГ в истощённых месторождениях, а также других геологических и геолого-технологических объектов.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи, выполнении аналитических исследований, разработке и реализации математических экспериментов, разработке технологии геологического моделирования ПХГ, а также методических рекомендаций для её практического применения.

Апробация и внедрение результатов

Разработанные автором методики геологического и комплексного геолого-геофизического моделирования, рассмотренные в диссертационной работе, в течение ряда лет успешно применяются при проведении практических работ по геологическому моделированию, экспертизе геологических моделей и авторскому надзору за эксплуатацией различных отечественных и зарубежных ПХГ, выполняемых в Центре ПХГ «ООО Газпром ВНИИГАЗ».

Участие автора в работе по ПХГ Республики Беларусь, позволившее на основе предложенных им методик оценки неопределённости газонасыщенности по данным ГИС-контроль дать предложения по совершенствованию системы геофизического мониторинга и доразведке объекта, было отмечено благодарностью ООО «Газпром ВНИИГАЗ» «за высокий профессиональный уровень в работе по авторскому надзору за эксплуатацией Прибугского и Осиповичского ПХГ».

Результаты научных исследований автора и полученные при этом практические результаты докладывались автором на восьми научно-практических конференциях, в том числе пяти международных: 11-й Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли», Москва, 2010г.; 11-й конференция пользователей ROXAR России и СНГ, Анталия, 2010г.; II международной научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», Москва, 2010г.; Научном симпозиуме «Неделя горняка-2011», Москва, 2011г.; Семинаре «Инновации в нефтяной геологии и геофизике», Москва, 2011г.; III Международной научно-практической конференции «Подземное хранение газа: Надёжность и эффективность» (UGS-2011), Москва, 2011г.; XII ежегодной международной конференции «Гальперинские чтения, 2012», Москва, 2012г.; III Международной научно-практической конференции и выставке «Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения» (WGRR-2013), Москва, 2013г.

Работа автора «Количественная оценка достоверности геологического моделирования в условиях нестационарности геостатистических характеристик геологической среды» была

удостоена первого места научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», проходившей в 2010 г.

Научные наработки автора легли в основу разработанного им учебного курса «Геологическое моделирование ПХГ», преподаваемого им в рамках дисциплины «Компьютерное моделирование создания и эксплуатации ПХГ» на базовой кафедре «Газовые технологии и подземное хранение газа» РГУ Нефти и Газа им. Губкина. Автором были разработаны программа и методические материалы данного курса, которые в дальнейшем легли в основу соответствующих глав учебного пособия «Компьютерное моделирование создания и эксплуатации ПХГ» (готовится к печати в 2016 году).

Публикации

Основные результаты исследований по теме работы опубликованы в 15 научных работах, 9 из которых входят в перечень изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит постановка и решение задач, связанных с геологическим моделированием, проведение вычислительных экспериментов и обработка полученных результатов, подготовка научной графики и текста публикаций.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения, списка литературы, содержащего 105 наименований. Работа изложена на 191 странице текста, содержит 94 рисунка и 2 таблицы.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.т.н., профессору В.С. Афанасьеву, а также д.г.-м.н., профессору В.Г. Фоменко, д.г.-м.н., профессору В.И. Пахомову, к.г.-м.н. В.Е. Кан, д.г.-м.н. Соловьеву Н.Н., к.г.-м.н. А.Г. Черникову, А.Б. Выдрику, Н.Б. Зиновой, В.Л. Бондареву, д.т.н., профессору К.И. Джафарову за помощь в подготовке данной работы, проведении исследований, ценные научные идеи и конструктивную критику.

ГЛАВА 1. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ТРЁХМЕРНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО И КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПХГ

В области геологического и комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ можно выделить ряд крупных задач:

- собственно построение геологической модели ПХГ, подразумевающее комплексирование данных ГИС-бурение, исследований керна и выполненного на их основе петрофизического моделирования, результаты площадных геофизических исследований, и авторские интерпретации этих данных, которые дополнительно могут учитывать результаты гидродинамических испытаний и промысловых данных, региональные геологические построения и т.п. Сюда же относится подготовка данных для гидродинамического моделирования.
- уточнение геологической модели ПХГ на основе результатов гидродинамического моделирования.
- проведение различных расчётов и аналитических работ на геологической модели, например, оценки прогнозных объёмов структуры, выявления возможных направлений перетока газа и т.п.
- проведение экспертизы геологической модели ПХГ, подразумевающей оценку корректности уже построенной сторонним авторским коллективом геологической модели.
- анализ динамики газонасыщенности по данным ГИС-контроль, проведение расчётов на основе результатов геологического моделирования и данных ГИС-контроль, уточнение геологической модели ПХГ на основе данных ГИС-контроль.
- подготовку пространственных данных для геологического моделирования и пространственный анализ геолого-геофизических и промысловых данных и результатов моделирования, которые могут быть выделены в отдельный класс задач геоинформационного сопровождения создания и эксплуатации ПХГ.
- комплексное геолого-геофизическое моделирование ПХГ, сочетающее черты геологического моделирования, анализа динамики ГИС-контроль, и геоинформационного сопровождения создания и эксплуатации ПХГ

Выполнение каждой из рассмотренных задач включает ряд сложно взаимосвязанных внутренних процедур, требующих применения специализированного программного обеспечения (ПО). Разработка таких программных продуктов в большинстве случаев является

трудоёмким процессом, требующим многолетней работы коллектива высококвалифицированных специалистов: программистов, математиков, геологов, специалистов по разработке месторождений. Поскольку таких коллективов в мире существует относительно немного, в первую очередь речь идёт о выборе одного из уже существующих программных решений, являющихся результатом их многолетней работы.

Исторически становление трёхмерного геологического моделирования ПХГ пришлось на непростой период 90-х – 2000-х годов, в который происходила существенная перестройка мирового и отечественного рынка геолого-геофизического программного обеспечения. В мире происходила революция персональных компьютеров и интегрированных систем моделирования, в России – попытка крупных авторских коллективов с многолетней практикой работы в отечественной нефтегазовой отрасли сааптироваться к рыночным условиям. Итогом данного периода стал почти полный переход на использование интегрированных программных продуктов зарубежного производства, первоначально разработанных для нефтяных месторождений, которые в дальнейшем были по возможности были адаптированы для моделирования газовых месторождений. Данные программные продукты первоначально не в полной мере учитывали специфику отечественной практики ведения работ и утверждения их результатов, не говоря уже о специфике моделирования ПХГ, сам факт наличия которой до недавнего времени даже не рассматривался. В первую очередь это можно объяснить тем, что российский рынок являлся для крупных компаний лишь одним из многих регионов продаж, поэтому его специфические запросы учитывались в порядке общей очереди. Геологическое моделирование ПХГ являлось ещё менее распространённой задачей по меркам мировой нефтегазовой отрасли, поэтому приоритет решения специфических задач их моделирования был ещё ниже. Фактически, даже вышедший впоследствии отечественный программный продукт трёхмерного моделирования «Геомод», единственный, для которого официально была заявлена поддержка моделирования не только месторождений, но и ПХГ, фактически не предлагал какой-либо функциональности, специфичной исключительно для моделирования ПХГ. Так, А.В. Жардецкий, ведущий разработчик данного программного продукта, рассматривая в своей работе сложившуюся ситуацию на рынке ПО для геологического моделирования [40], и оценивая пригодность существующих программных средств зарубежного производства для моделирования отечественных месторождений и ПХГ, указывал на их неполную приспособленность для отечественных реалий. При этом предлагаемый в качестве решения проблемы «Геомод», хотя и учитывал потребности отечественной нефтегазовой отрасли и обладал рядом специфических и в целом новаторских технических решений, таких как хранение всех данных в единой БД, алгоритмы перекрёстной проверки, продвинутое средства корреляции скважин, в большинстве аспектов являлся аналогом

зарубежных программных продуктов. Хотя в дальнейшем Геомод успешно применялся для моделирования ряда объектов ПХГ [37], задача моделирования ПХГ ни при его создании, ни при использовании не рассматривалась, как обладающая какой-либо методической или алгоритмической спецификой. Даже одна из самых явных алгоритмических особенностей моделирования ПХГ в водоносном пласте, связанная с обеспечением корректности моделирования при крайне высокой площадной неоднородности размещения скважин и скважинных данных, в качестве отдельной проблемы не рассматривалась, обеспечение корректности интерполяции поверхностей возлагалось на используемый алгоритм интерполяции Аронова. Сам же Аронов в своих исследованиях [9], хотя и проводит детальный анализ оптимальности алгоритмов интерполяции поверхностей по точечным данным, предлагая свой алгоритм, являющийся одним из наиболее совершенных из существующих в настоящее время, рассматривает вопрос в первую очередь в абстрактной теоретической форме, не касаясь непосредственно задачи геологического моделирования ПХГ.

После «Геомода» других попыток создания полноценной системы геологического моделирования, ориентированной в том числе и на моделирование ПХГ не производилось, даже несмотря на то, что, практика моделирования таких объектов показала наличие специфических черт, требующих применения специфических подходов для достижения корректности моделирования [29].

В настоящее время геологическое моделирование ПХГ ведётся с использованием программных средств отечественного и зарубежного производства, разработанных для нефтегазовых месторождений с использованием доступных в них методик и вычислительных алгоритмов. Такая ситуация прослеживается с начала становления трёхмерного геологического моделирования ПХГ до настоящего времени, и, поскольку разработка нового программного продукта или существенная модификация уже существующего является весьма трудоёмкой задачей, аналогичная ситуация вероятно будет наблюдаться в ближайшем будущем. Исходя из этого, рассмотрение задачи геологического моделирования ПХГ в настоящее время в значительной степени ориентировано на рациональное использование инструментария, уже реализованного в существующих программных продуктах моделирования нефтегазовых месторождений и в отдельных случаях расширении их функциональности на основе дополнительных модулей, программных процедур или формировании специализированных требований к компании-разработчику, но не на разработку некоего принципиально нового программного продукта.

В различное время для геологического моделирования отечественных ПХГ применялись такие программные продукты как Сигма, Surfer (двухмерное и псевдотрёхмерное моделирование), а также Геомод, Schlumberger Petrel, ROXAR RMS, DV-Geo (трёхмерное

моделирование). Известно, что для моделирования украинских ПХГ активно использовался программный комплекс TimeZYX. В настоящее время наибольшее количество как отечественных, так и зарубежных моделей ПХГ создаётся и поддерживается с использованием программных продуктов Schlumberger Petrel и ROXAR RMS, являющимися также и лидерами рынка программных продуктов трёхмерного геологического моделирования нефтегазовых месторождений. Несмотря на это, концепция системы геологического моделирования как надстройки над базой данных геолого-геофизической информации, лежащая в основе Геомода, всё также является актуальной (это направление в настоящее время активно развивают зарубежные пакеты), а инструменты проверки и подготовки исходных геолого-геофизических данных, реализованные в DV-Geo, являются, по всей видимости, лучшими в своём роде. В то же время, поскольку используемое для построения моделей ПО во многом декларируется требованиями заказчика, в дальнейшем, с изменением функциональности различных программных комплексов и ценовой политики его разработчиков, возможно постепенная миграция в сторону других программных продуктов моделирования месторождений, пока массово не применявшихся для моделирования ПХГ. Здесь можно выделить такие продукты как отечественный ЦГЭ DV-Geo и зарубежные Paradigm SKUA-GOCAD, Halliburton DecisionSpace, CGG EarthModel FT и другие. В случае отечественных ПХГ, фактически принадлежащих единственному недропользователю (ООО «Газпром ПХГ», 100-процентное дочернее предприятие ПАО «Газпром»), выбор используемого ПО будет диктоваться в первую очередь политикой данного общества в области используемых программ.

1.1 Типовая последовательность и методические подходы к построению геологической модели

Как правило, говоря о моделировании ПХГ, подразумевают построение так называемой постоянно действующей геолого-технологической модели ПХГ (ПДГТМ ПХГ), представляющей собой комплекс из взаимоувязанных геологической и гидродинамической моделей, регулярно обновляемых при поступлении новых геолого-геофизических и промысловых данных по объекту [1]. Для достижения требуемого соответствия в ходе гидродинамического моделирования могут вноситься правки в геологическую и, в отдельных случаях, даже петрофизическую модель. Таким образом, все три этапа (петрофизическое, геологическое и гидродинамическое моделирование), выполняемые в различных программных продуктах на основе принципиально различающихся подходов, выступают в качестве единой комплексной модели объекта. Этап геологического моделирования, занимающий здесь позицию связующего звена между петрофизическим и гидродинамическим моделированием,

занимает здесь ключевую позицию (Рисунок 2). Помимо этого, если рассмотреть задачу изучения нефтегазового месторождения или ПХГ более обобщённо, проанализировав общую схему взаимодействия программных продуктов и основные потоки данных, возникающие при их взаимодействии (Рисунок 3), становится очевидным, что этап геологического моделирования занимает центральное положение, выступая в роли центрального связующего звена большинства рабочих процессов. При этом, если рассмотреть процесс развития средств геологического моделирования в динамике, можно отметить, что наблюдается тенденция расширения функциональности программных комплексов геологического моделирования с включением в них функций ранее традиционно выполнявшихся в специализированных программных продуктах. Так, многие современные среды геологического моделирования позволяют выполнять подготовку, запуск гидродинамического расчёта во внешнем гидродинамическом симуляторе и анализ результатов гидродинамического моделирования, имеют средства анализа неопределённости, интерпретации результатов сейсморазведочных работ, отдельные инструменты подготовки скважинных данных и петрофизического моделирования, а в некоторых случаях – подготовки и анализа пространственных данных, анализа истории осадконакопления.

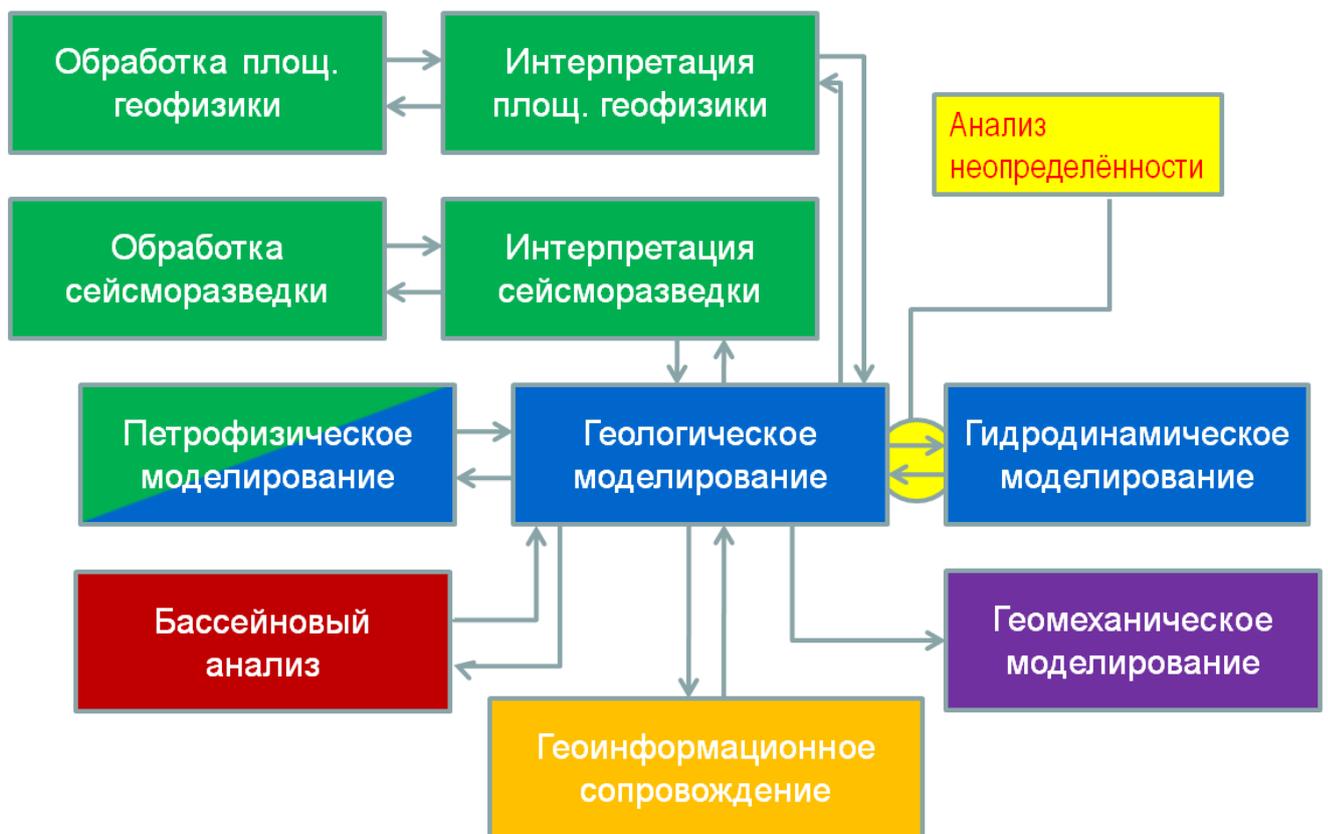


Рисунок 3 – комплексы задач, решаемых в ходе изучения и мониторинга эксплуатации нефтегазового месторождения (ПХГ) и основные потоки данных, возникающие при взаимодействии соответствующих программных продуктов

Хотя применявшиеся и применяемые программные комплексы существенным образом различаются интерфейсом пользователя, поддерживаемыми операционными системами, удобством и стабильностью работы, стоимостью и уровнем технической поддержки, используемые в них общие принципы моделирования, принципиально не различаются.

Основными исходными данными, используемыми для геологического моделирования, являются:

- Данные о траектории скважин: координаты устьев скважин, альтитуды их устьев, глубины забоев, результаты скважинной инклинометрии
- Стратиграфические и литологические отбивки (маркеры) по всем скважинам моделируемого объекта
- Данные каротажа и РИГИС по всем скважинам моделируемого объекта
- Результаты интерпретации площадных геофизических исследований (сейсморазведки, электроразведки, гравиразведки, гравимагнитной съёмки и др.) – как правило, в виде структурных поверхностей и поверхностей разрывных нарушений, структурных карт. Для результатов сейсморазведки – часто в виде трёхмерных кубов данных
- Результаты экспертных построений - как правило, в виде структурных карт
- Отбивки флюидных контактов в скважинах (в случае моделирования объектов ПХГ в истощённых месторождениях)
- Данные отчётов, региональных и обобщающих построений

Общая последовательность моделирования включает загрузку и проверку исходных данных, построение структурного каркаса модели, моделирование распределения свойств, оценку достоверности моделирования и экспорт модели для проведения гидродинамических расчётов. Этап загрузки данных включает загрузку и воспроизведение в модели данных о траектории скважин (Рисунок 4а), загрузку результатов скважинной геофизики, пластовых отбивок (Рисунок 4б), основных структурных построений (Рисунок 4в, г).

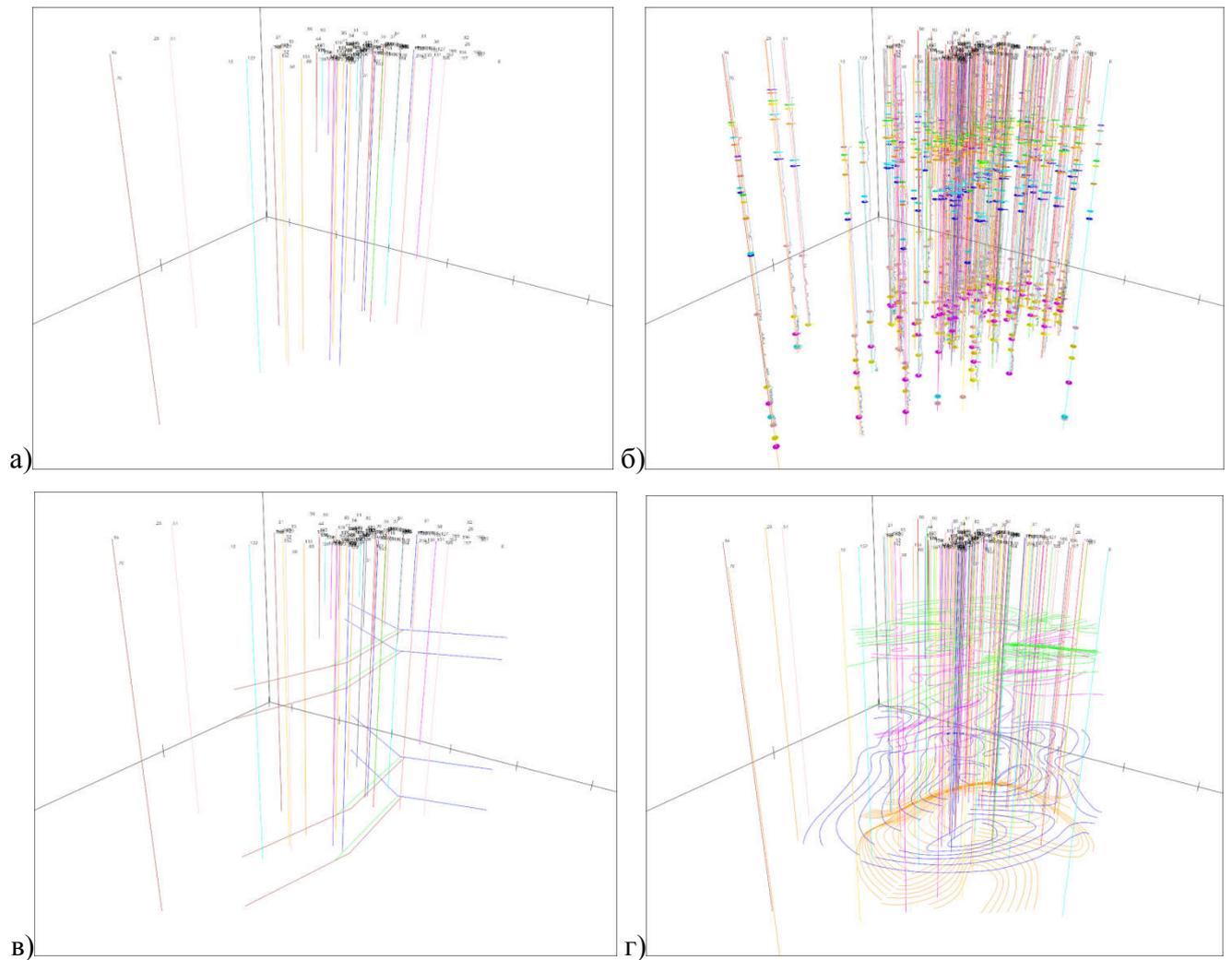


Рисунок 4 – загрузка данных в геологическую модель: а – траектории скважин, б – данные скважинной геофизики и пластовых отбиток, в – границы разрывных нарушений, г – изолинии основных структурных поверхностей

На этапе структурного моделирования на основе загруженных данных производится построение структурного каркаса модели, включающего модель разломов и основные структурные поверхности (Рисунок 5). При необходимости, на основе опорных структурных построений строится детальная структурная модель, в которую вводятся все промежуточные границы. Полученный каркас воспроизводит все имеющиеся данные, при этом в двухмерном отображении все построенные поверхности являются их структурными картами (Рисунок 6).

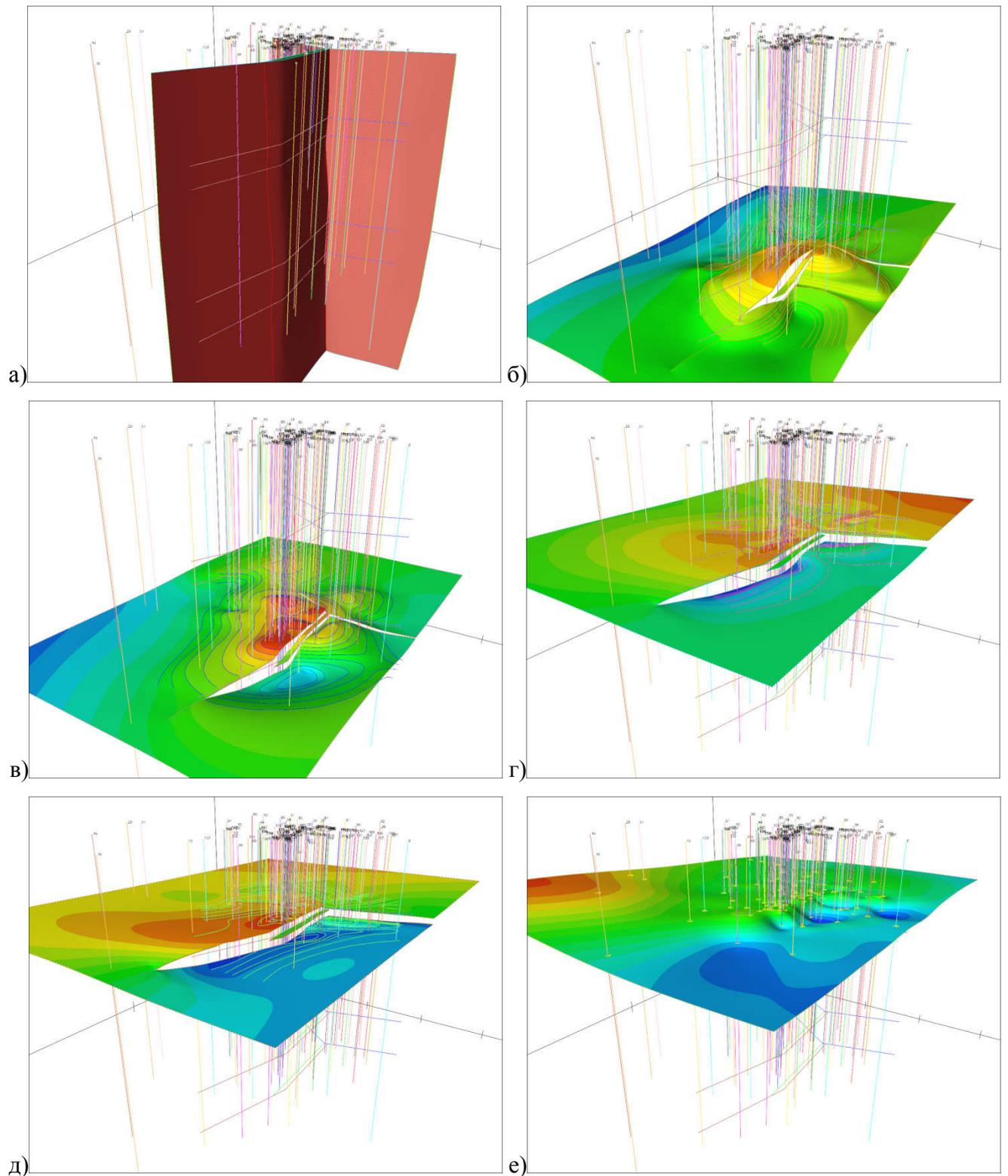


Рисунок 5 – основные составляющие структурного каркаса трёхмерной геологической модели:
 а – модель разрывных нарушений, б-е – основные структурные поверхности, построенные с учётом модели разломов

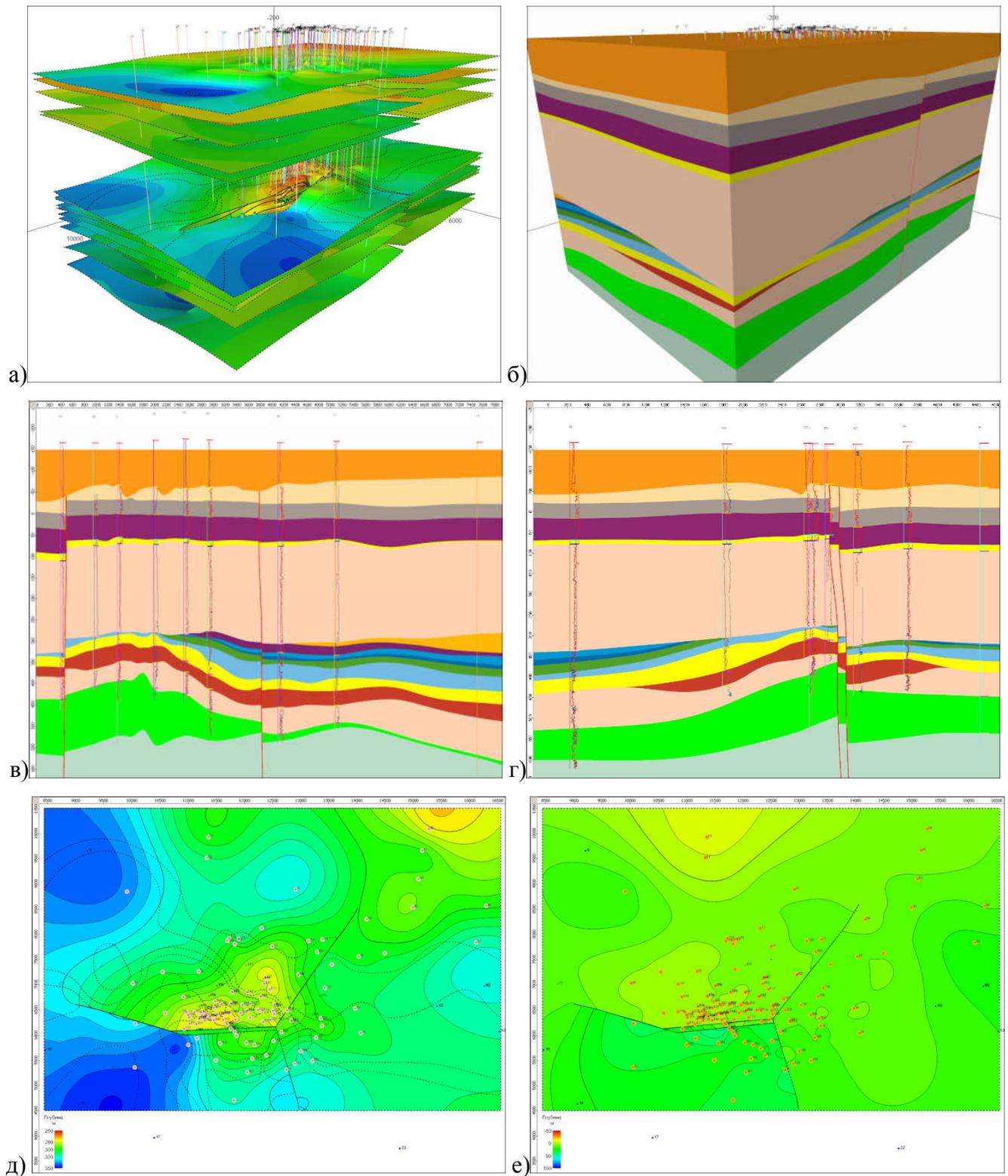


Рисунок 6 – структурный каркас геологической модели: а, б – общий вид: а – в виде набора поверхностей (отображение разломов выключено), б – в твердотельном отображении; в, г – сечения модели по различным скважинам, демонстрирующие соответствие полученного каркаса исходным данным, д, е – в виде структурных карт по отдельным горизонтам

Для заданных интервалов структурного каркаса задаётся трёхмерная сетка, на которой будут вестись дальнейшее построение распределение свойств. Характер распределения ячеек

внутри сетки выбирается исходя из условий осадконакопления. В случае моделирования ПХГ, чтобы избежать избыточного количества ячеек гидродинамической сетки, интервалы соответствующие надпродуктивной толще и отложениям, подстилающим пласт-коллектор могут задаваться в виде отдельных сеток (Рисунок 7). На полученный трёхмерный каркас переносятся свойства с траекторий скважин (Рисунок 8а), выступающие в дальнейшем в качестве исходных данных для моделирования трёхмерного распределения свойств (Рисунок 8б, в, г). Аналогично строятся распределения остальных свойств (Рисунок 9).

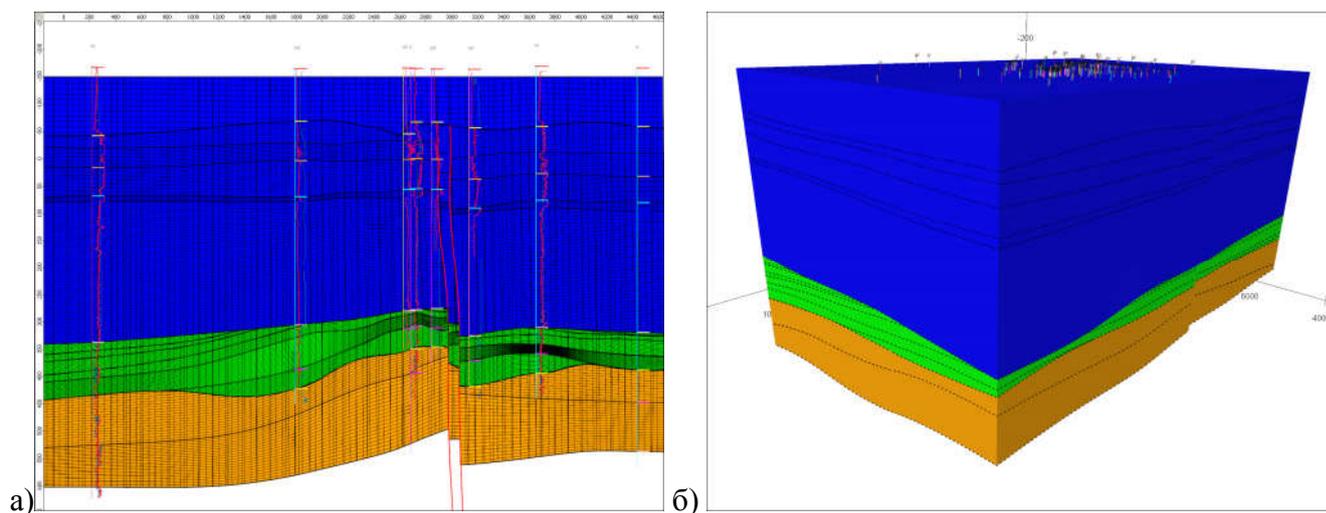


Рисунок 7 – каркас параметрической модели: а – строение каркаса сеток параметрических моделей продуктивной толщи (зелёный), надпродуктивной толщи (синий) и подстилающей толщи (оранжевый), б – общий вид

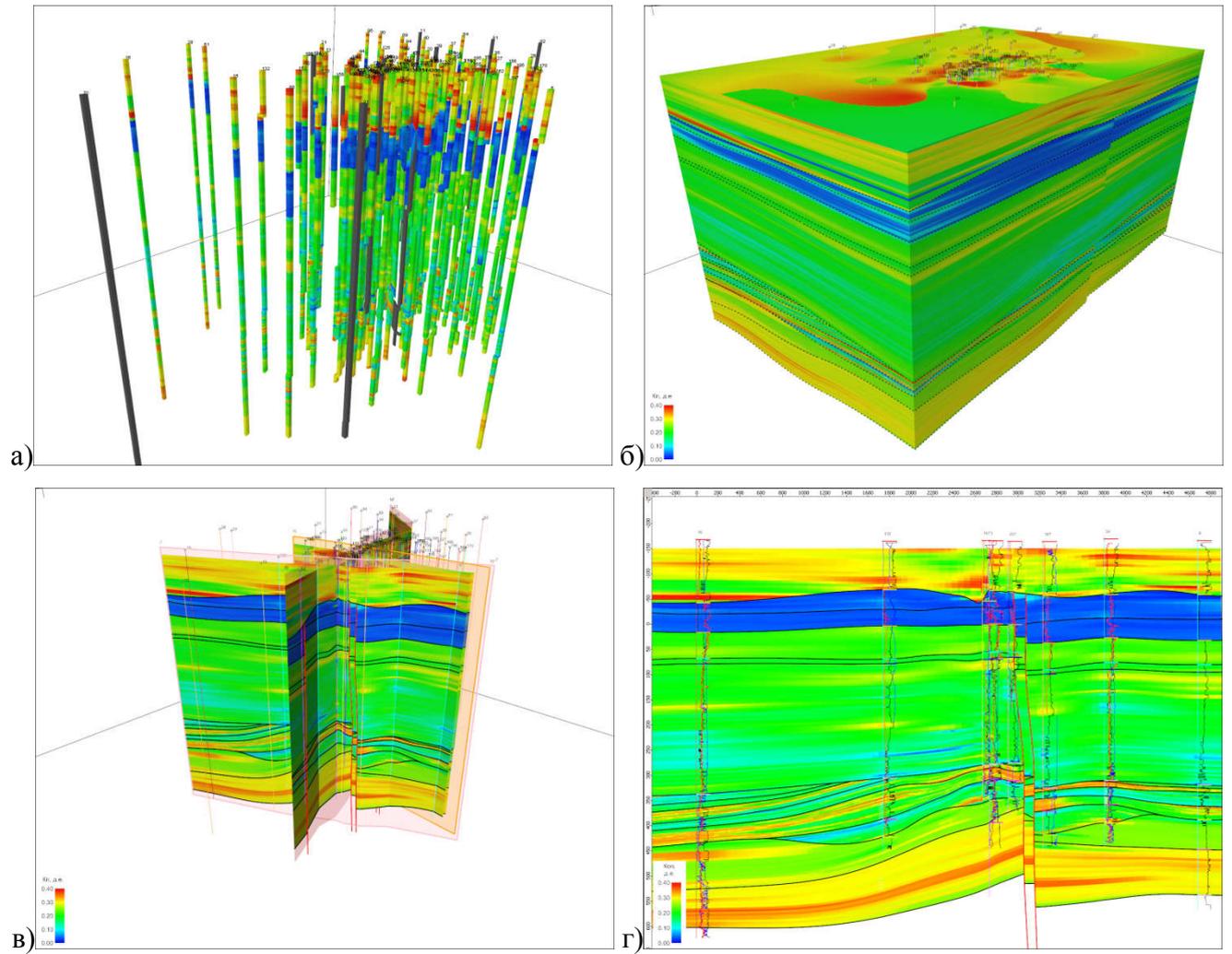


Рисунок 8 – общий вид прогнозных значений пористости, перемасштабированных на ячейки сетки (а), полученное на их основе трёхмерное распределение свойств (б) и его сечения (в, г)

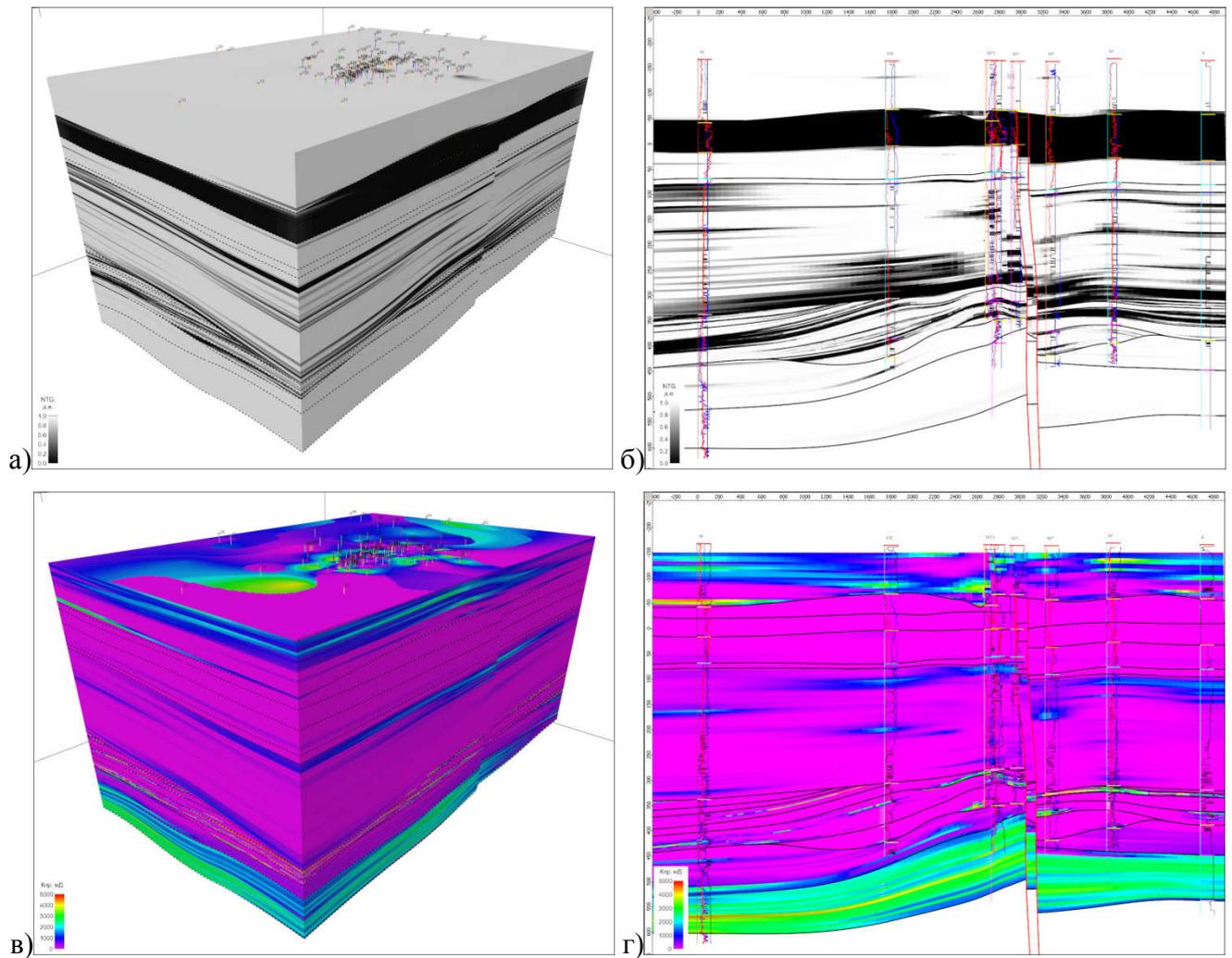


Рисунок 9 – общий вид распределения значений доли коллекторов (а) и его сечение (б), распределения значений проницаемости – (в) и его сечение (г)

Так же, как и все промежуточные построения, полученные результаты в обязательном порядке проходят различные количественные, качественные и экспертные проверки, подтверждающие логическую, математическую и геологическую корректность полученных результатов (Рисунок 10).

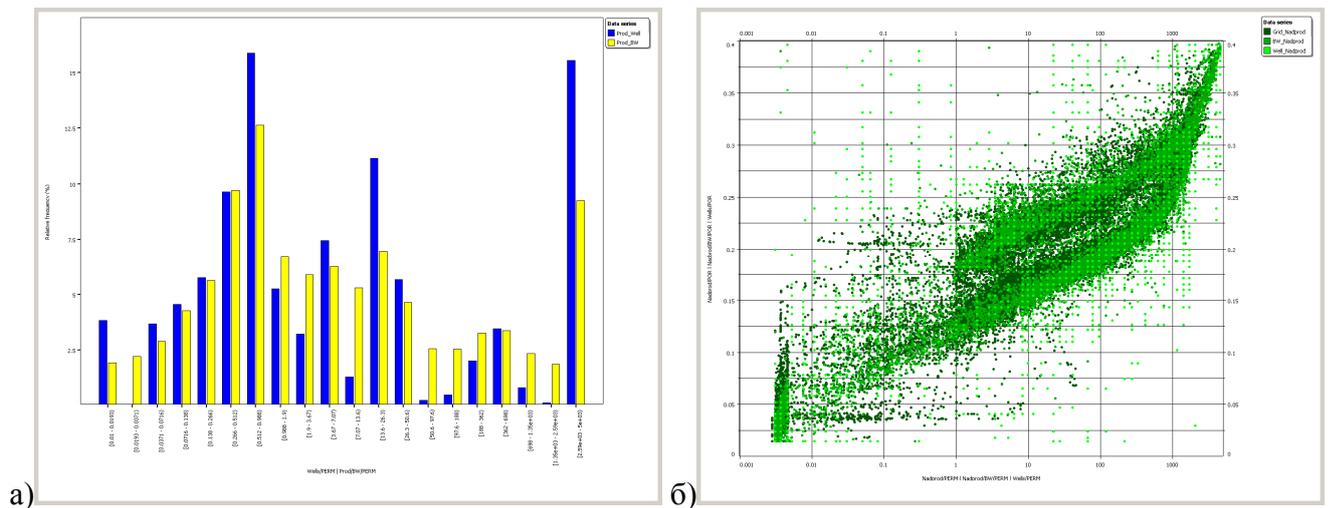


Рисунок 10 – гистограммная проверка качества перемасштабирования скважинных данных на ячейки сетки (а) и сопоставление распределений параметра по ячейкам, на которые были перемасштабированы скважинные данные, и по всем ячейкам модели

Полученные трёхмерные распределения используются как для подготовки основы для гидродинамического расчёта, так и для различных расчётов непосредственно на геологической модели. Так, могут быть рассчитаны карты средних значений по пласту, объёмы структуры, в зависимости от заданной граничной изогипсы и т.д., что бывает востребовано при проведении ряда работ, особенно на этапе проектирования ПХГ (Рисунок 11, 12).

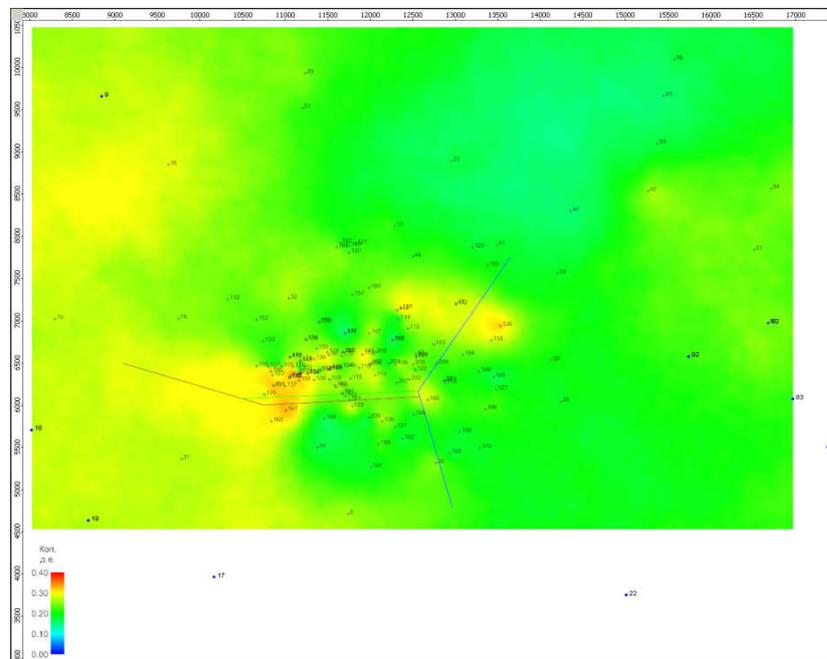


Рисунок 11 – карта распределения средней пористости по одному из горизонтов, рассчитанная на основе трёхмерной геологической модели

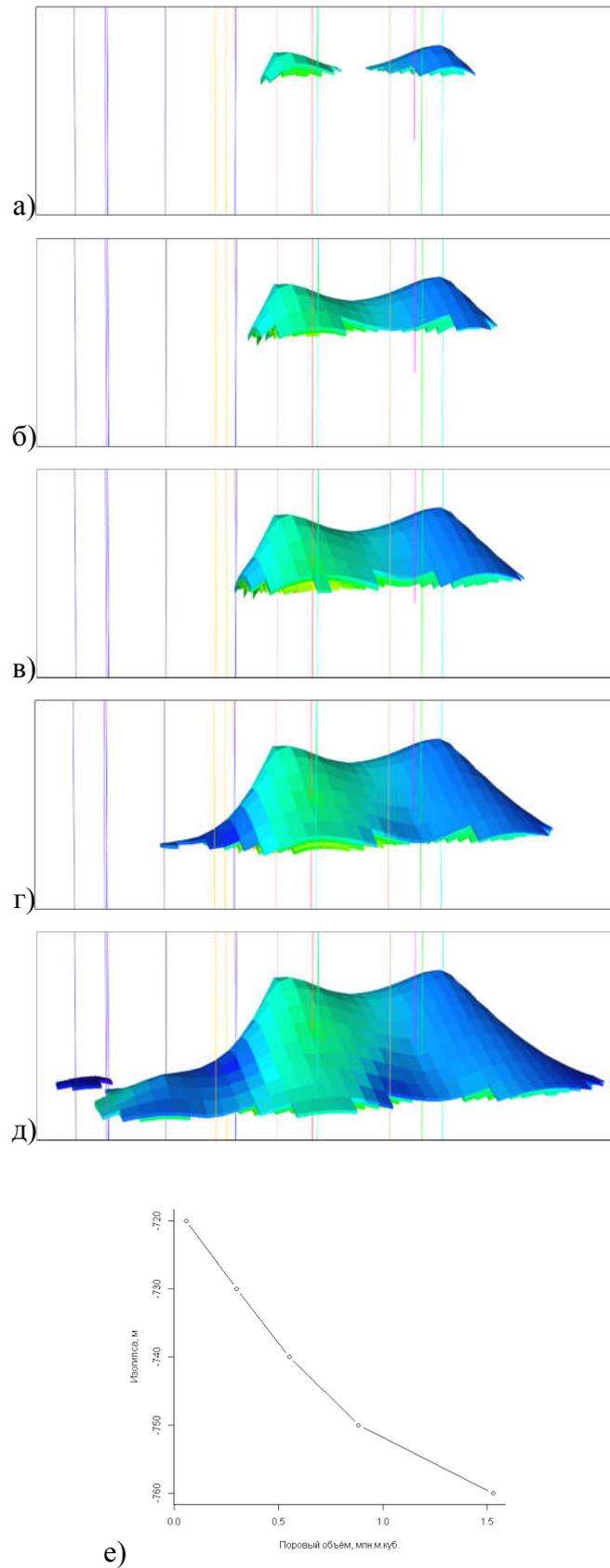


Рисунок 12 – расчёт на трёхмерной геологической модели объёма ловушки в зависимости от заданной граничной изогипсы (а - д) и полученная сводная зависимость изменения объёма ловушки от граничной изогипсы (е)

Для обеспечения возможности проведения гидродинамических расчётов производится огрубление сетки и перенос на ней свойств с детальной сетки геологической модели. Необходимость огрубления (ремасштабирования) связана с тем, что современные гидродинамические симуляторы позволяют за приемлемые сроки (часы - дни) лишь модели содержащие сотни тысяч ячеек, в то время как геологические модели, как правило, содержат миллионы - десятки миллионов ячеек. Полученная оптимизированная сетка может отличаться конфигурацией, направленную на максимально возможное снижение количества ячеек (Рисунок 13).

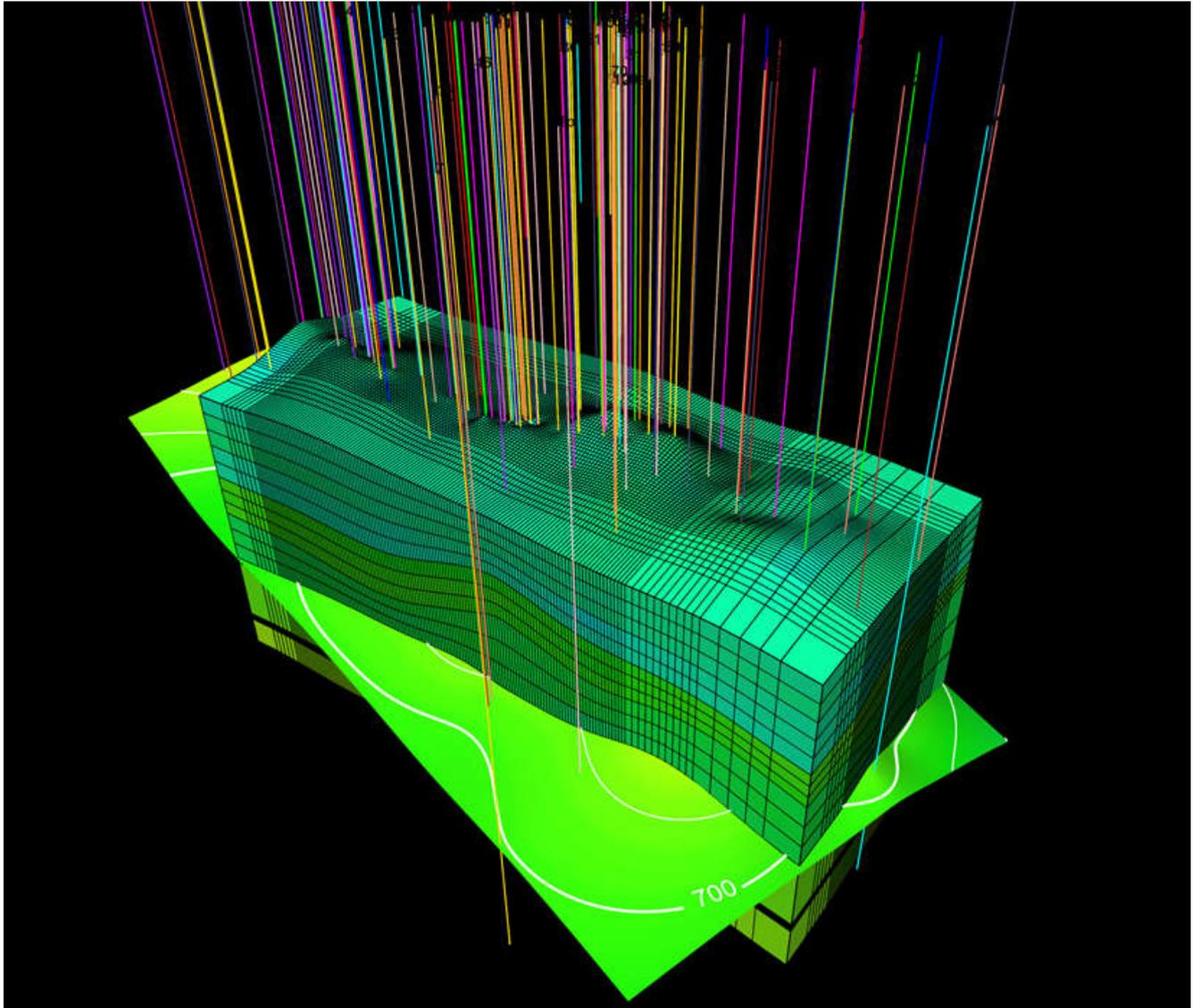


Рисунок 13 – сопоставление структурной поверхности из геологической модели и сетки для гидродинамической расчёта

Полученная геологическая модель впоследствии может уточняться при появлении новых данных, например, в результате геофизических работ, проводящихся в рамках доразведки объекта (Рисунок 14).

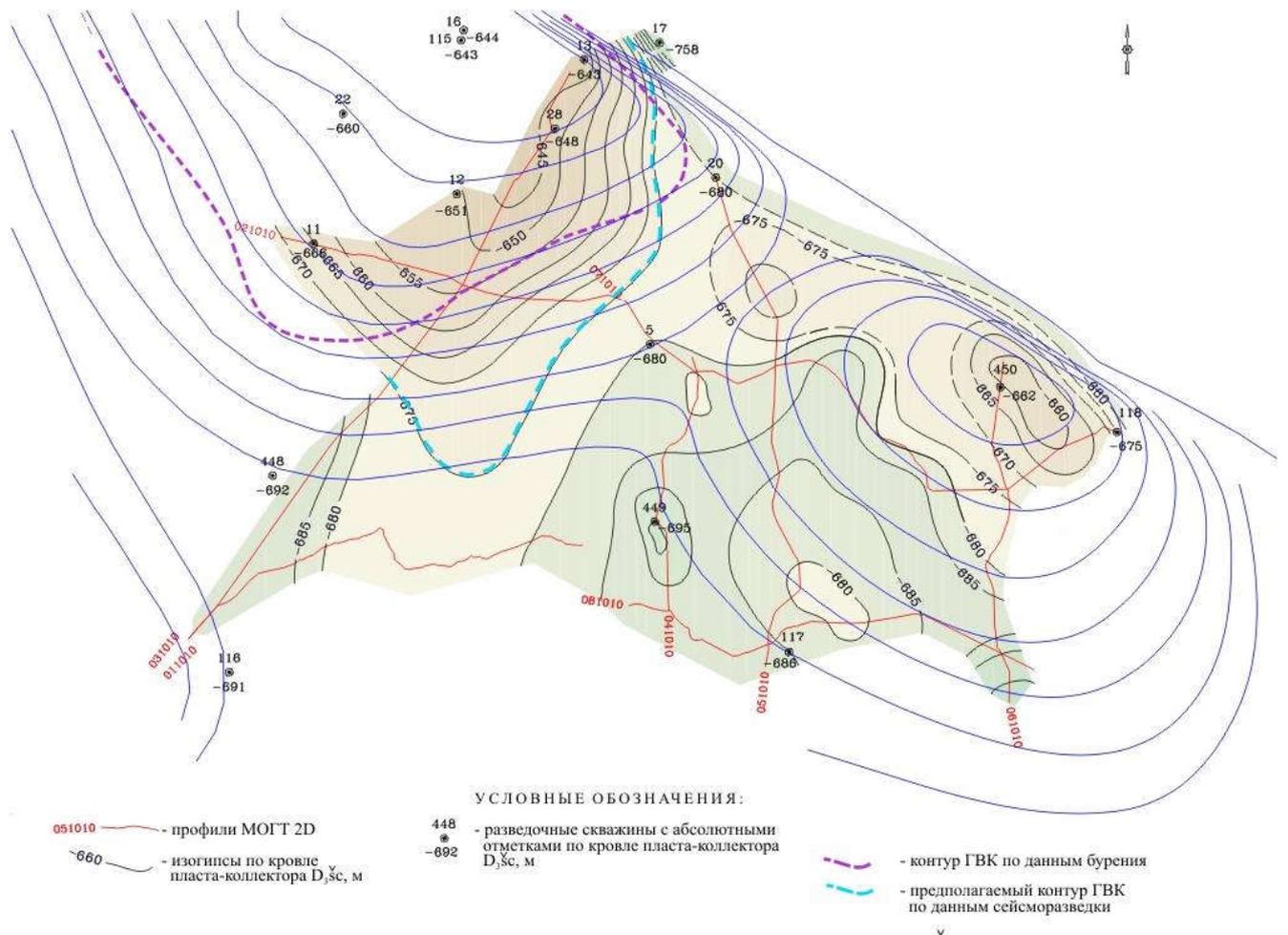


Рисунок 14 – уточнение кровли объекта эксплуатации по данным сейсморазведки

В случае ПХГ полученная геологическая модель может использоваться в качестве основы для анализа геолого-геофизических данных: анализу текущей газонасыщенности по данным регулярно выполняемых исследований ГИС-контроль (Рисунок 15), комплексированию результатов геофизических и геохимических исследований.

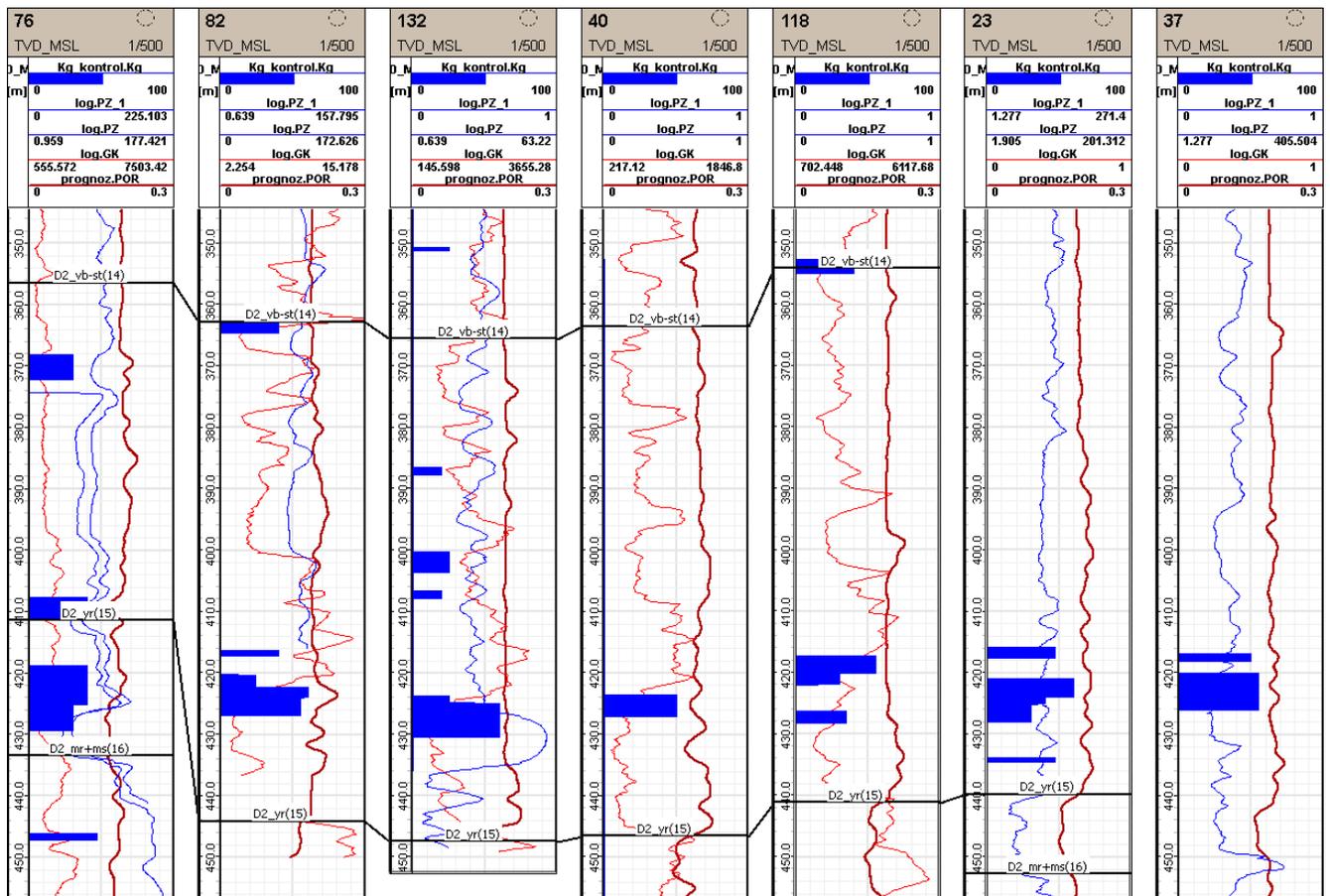


Рисунок 15 – анализ текущей газонасыщенности по данным ГИС-контроль

Традиционно анализ данных ГИС-контроль и расчёты на их основе выполняются в пакете геологического моделирования. В зависимости от постановки решаемой задачи, расчёты могут вестись как в трёхмерной форме (Рисунок 16, 17, 18), так и в двухмерной (Рисунок 19, 20).

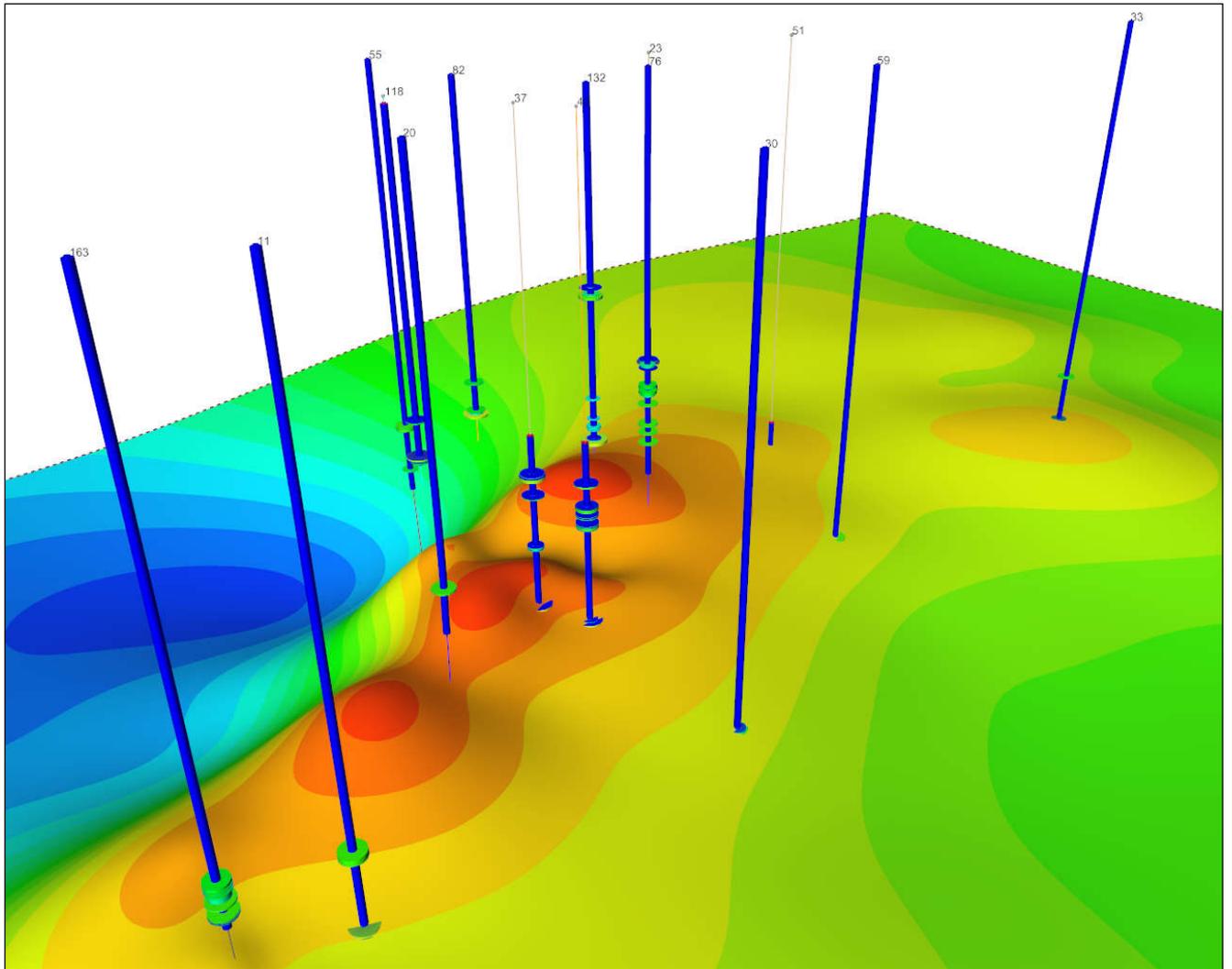


Рисунок 16 – данные ГИС-контроль, импортированные в геологическую модель

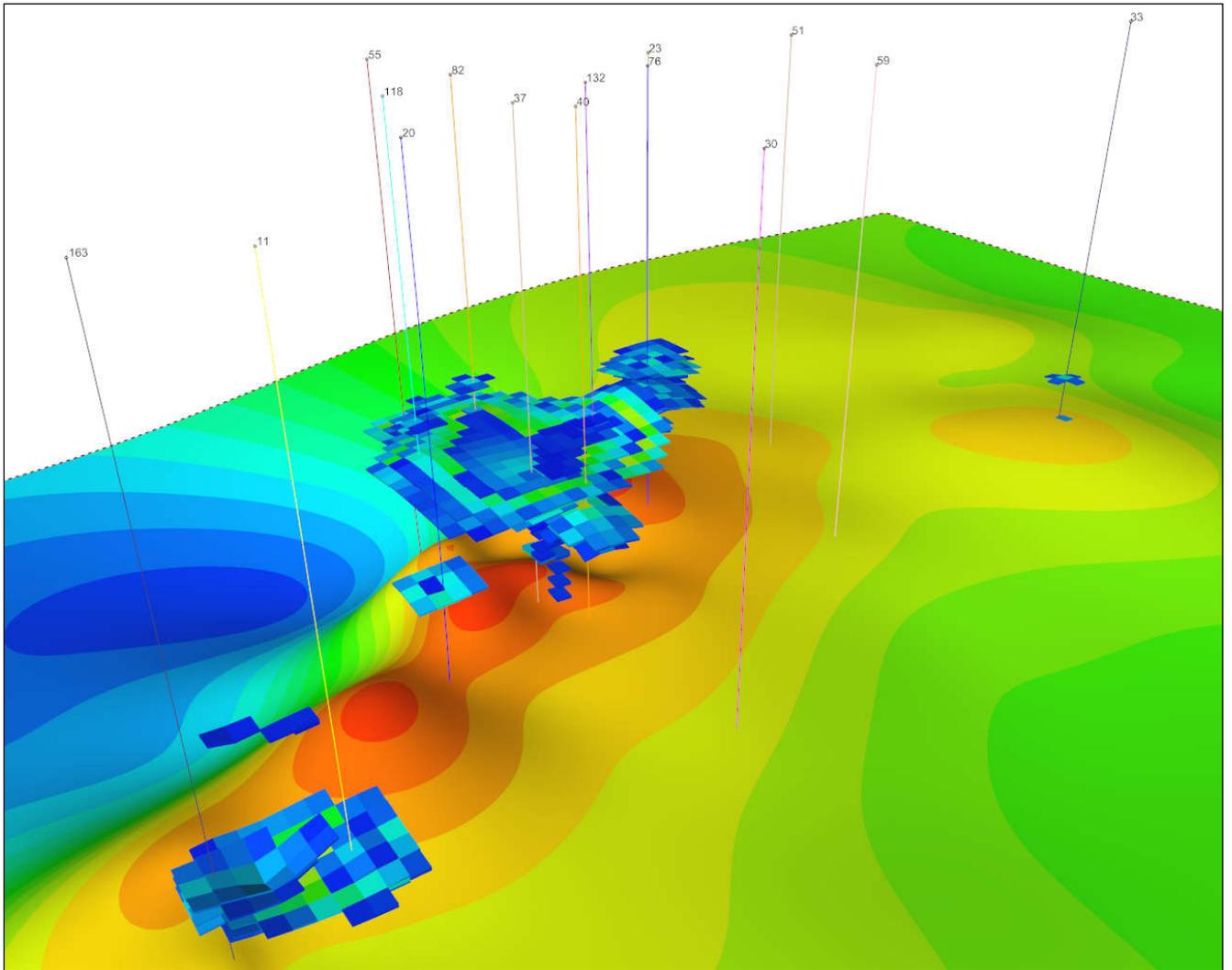


Рисунок 17 – трёхмерное распределение газонасыщенности в контрольных горизонтах ПХГ по данным ГИС-контроль, приведённым на рисунке 16

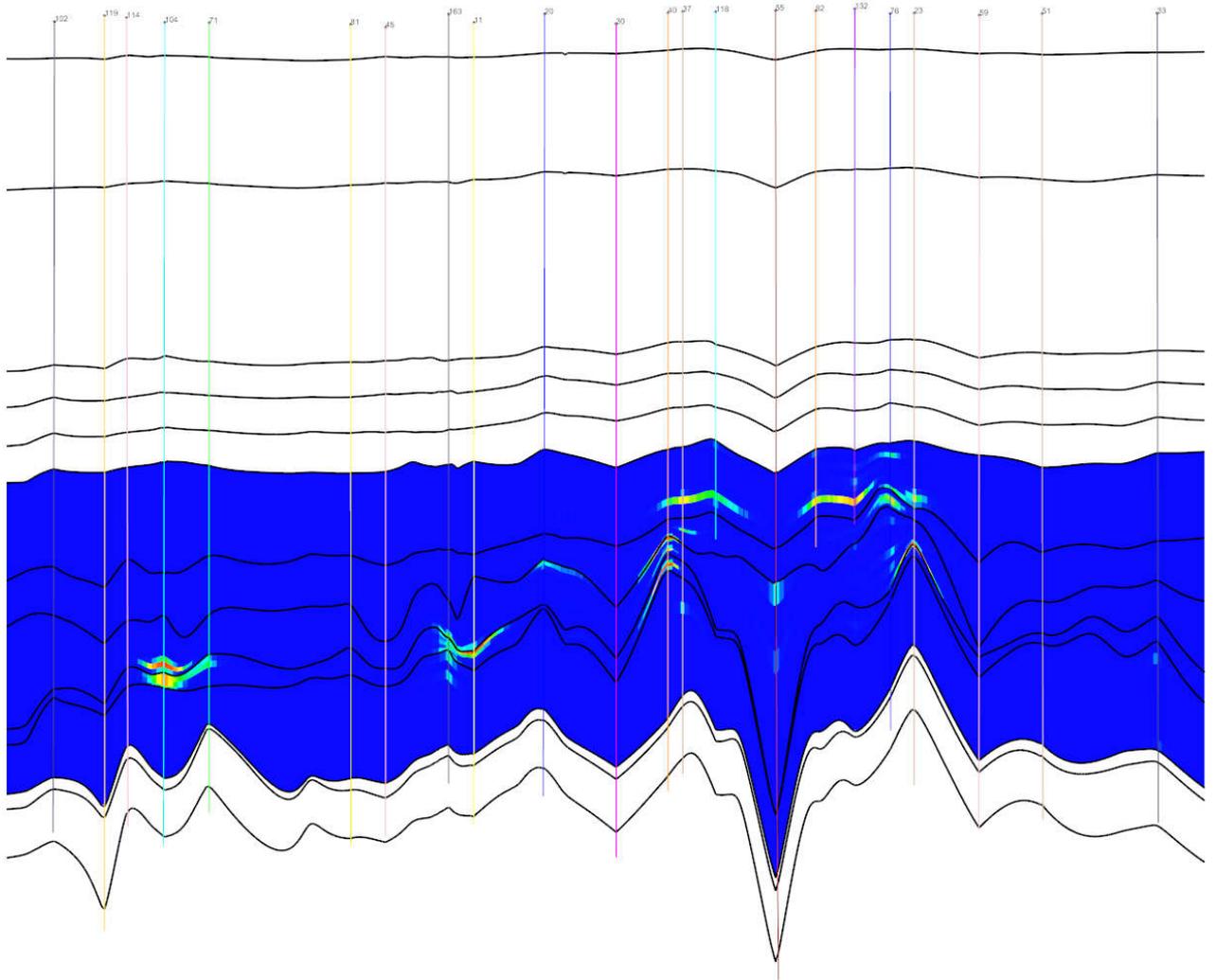


Рисунок 18 – анализ распределения газа в контрольных горизонтах ПХГ на основе модели газонасыщенности надпродуктивной толщи (вертикальное сечение)

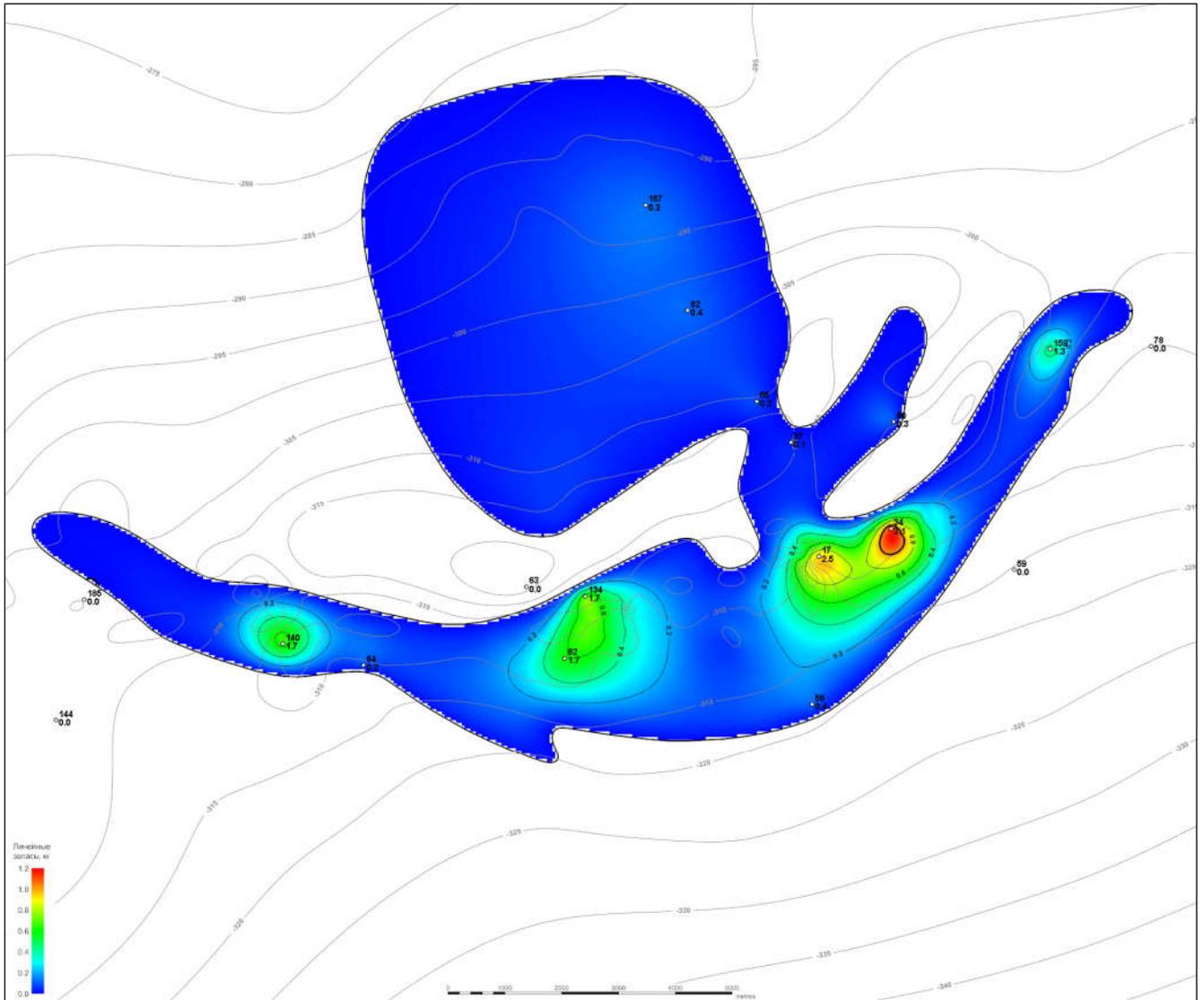


Рисунок 19 – результат двухмерного расчёта распределения газа в пласте-коллекторе ПХГ на основе данных ГИС-контроль

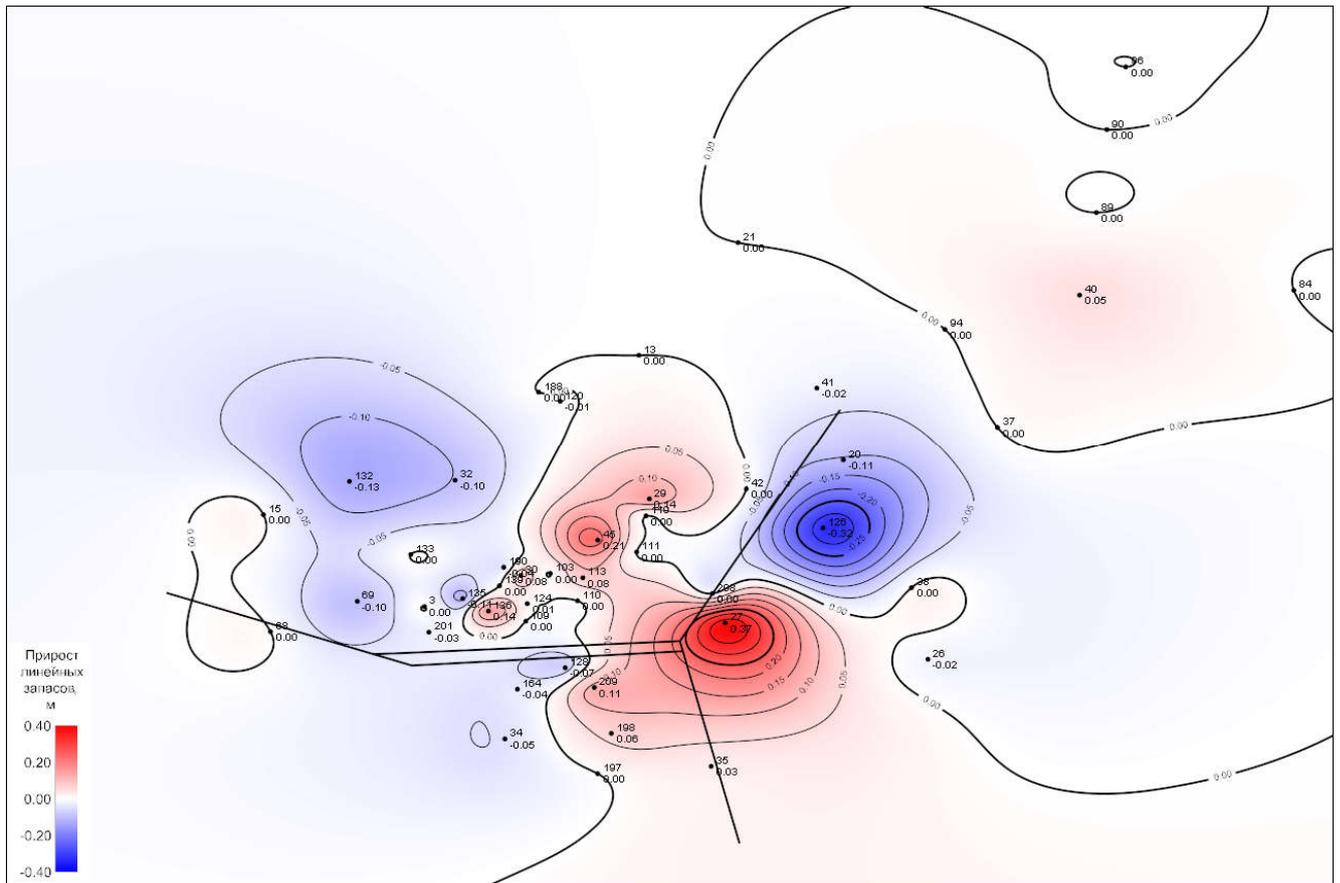


Рисунок 20 – результат двухмерного расчёта изменения распределения газа в контрольном горизонте ПХГ за некоторый период на основе на основе данных ГИС-контроль

Некоторой сложностью, существующей при работе с данными ГИС-контроль в пакетах геологического моделирования, является неприспособленность этих пакетов для решения подобных задач: сложностью организации импорта и хранения массива одноимённых, но разновременных методов, их вызова в зависимости от интересующего исследователя периода времени, существенно осложняя выполнение подобных работ и снижая их производительность. Основными решениями, позволяющими хоть как-то организовать подобную работу, является подмена истинных дат более обобщёнными, и использование вместо самих данных ГИС-контроль только результатов их интерпретации.

В случае если анализ вертикальной изменчивости или временных рядов по отдельным скважинам не требуется, а необходима оценка только площадного распределения на отдельные даты, более предпочтительным может быть использование различных геоинформационных систем и систем картопостроения, таких как QGIS, GRASS GIS, R, Golden Software Surfer, Isoline GIS и т.п. Это связано с тем, что значительная часть анализируемых данных является пространственными, либо может быть преобразована в пространственные, в связи с чем достаточно важной является задача обеспечения возможности полноценной работы с такими данными. Системы, позволяющие работать с пространственными данными, называют

географическими информационными системами, либо более обобщённо - геоинформационными системами [49]. Основными требованиями к таким системам является наличие средств хранения и визуализации пространственных данных, выполнения общего и пространственного анализа, операций импорта-экспорта, а также обеспечение удобного пользовательского интерфейса для выполнения необходимых операций. В общем случае можно говорить о задаче геоинформационного сопровождения создания и эксплуатации ПХГ, в которую анализ данных по газонасыщенности объекта эксплуатации и контрольных горизонтов входит только как одна из подзадач [21, 26, 33].

Традиционные растровые и векторные редакторы (Inkscape, GIMP, Corel, Photoshop и т.п.), удобные для выполнения графических и оформительских работ, оказываются неприемлемы для работы с данными, в том числе и пространственными. Это связано с тем, что архитектура таких систем, изначально создававшихся для художественно-оформительских работ, позволяет оперировать лишь сущностями компьютерной графики, и не предназначена для операций над абстрактными данными. Некоторый геоинформационный инструментарий присутствует в пакетах геологического моделирования и картопостроения, однако ряд критически важных функций, в подобных программных продуктах традиционно отсутствует, вынуждая проводить основные процедуры предварительной подготовки данных и анализа итоговых результатов в специализированных программных продуктах. Например, в пакетах геологического моделирования традиционно отсутствуют встроенные средства привязки и векторизация растров, перепроецирования данных из различных систем координат для их совместного отображения, функции атрибутивного анализа, визуализации данных на основе правил и т.д. Поэтому, хотя формально сами пакеты геологического моделирования также могут рассматриваться в качестве специализированных геоинформационных систем, на деле их возможности для работы с пространственными данными оказываются крайне ограничены. А поскольку решение задачи геологического моделирования во многих случаях также требует выполнения анализа и обработки пространственных данных, которые не могут быть выполнены непосредственно в рамках геологического моделирования, можно говорить об отдельном классе задач геоинформационного сопровождения процесса геологического моделирования (Рисунок 3).

Как правило, геоинформационный проект по моделируемому объекту заводится ещё до начала непосредственно процесса моделирования, используется в процессе моделирования параллельно с геологической моделью, являясь основой для проверки и подготовки пространственных данных и подготовки графики. Этот же проект может служить эффективной основой построения постоянно действующей геоинформационной системы ПХГ, используемой

для анализа текущей геофизической и промысловой информации, планирования работ по бурению, проведению работ по объектному мониторингу доразведке.

В зависимости от потребностей конкретных работ, в качестве основы может использоваться как геоинформационная система общего назначения, так и специализированная геолого-геофизическая геоинформационная система. Основными техническими преимуществами использования геоинформационных систем в рамках работ по созданию и эксплуатации ПХГ являются:

- невозможность промахов позиционирования объектов, связанных с работой «на глаз». В отличие от графических редакторов все объекты имеют строго заданную координатную привязку

- возможность выполнения процедуры привязки растров к системе координат проекта (Рисунок 21). Данная возможность уникальна для геоинформационных систем, не встречается ни в пакетах геологического моделирования, ни в графических редакторах

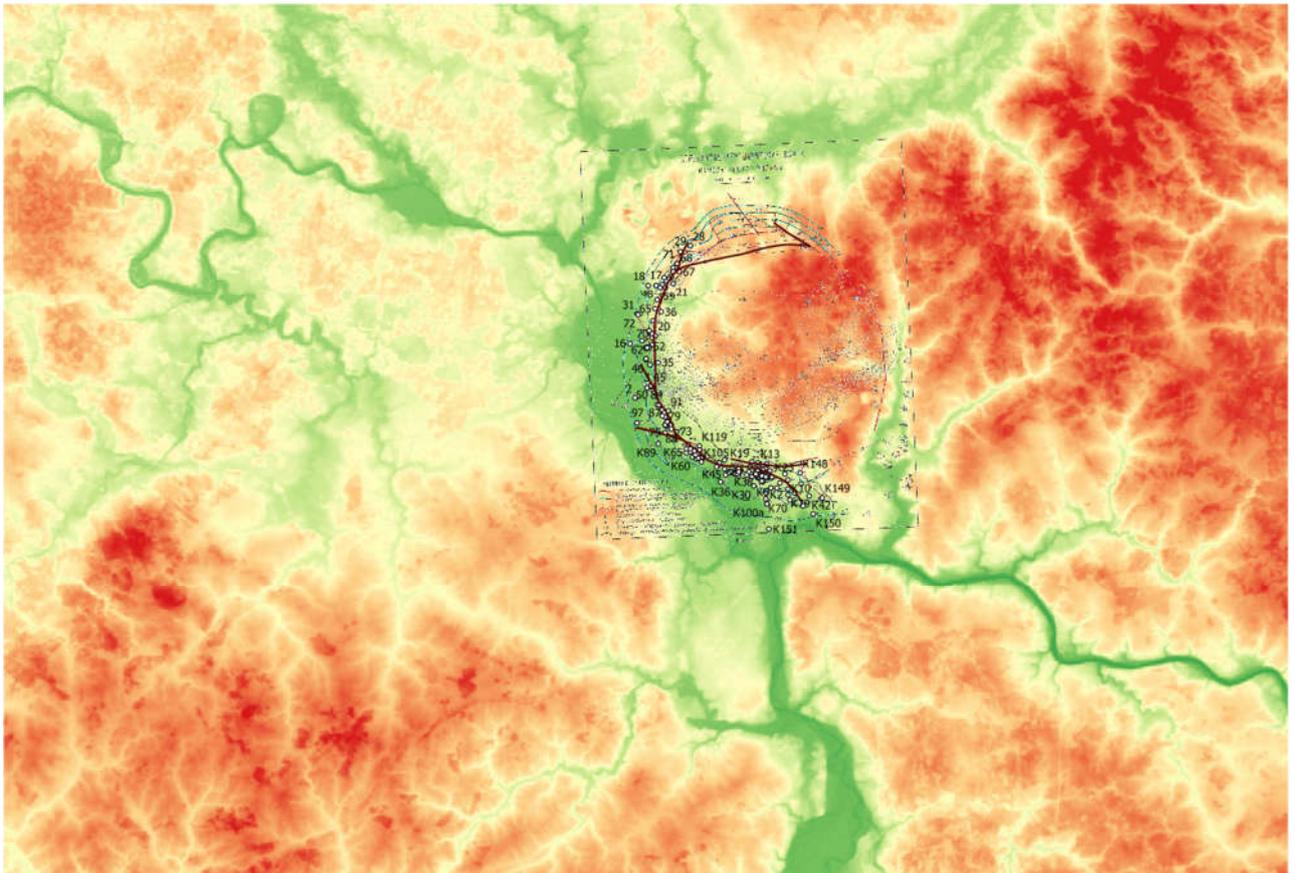


Рисунок 21 – сопоставление структурных построений одного из авторов, привязанных к проекту, с данными цифровой модели местности SRTM, полученной по данным радарной интерферометрии

- защита данных от случайного редактирования. В графических редакторах и некоторых пакетах геологического моделирования такая возможность отсутствует

- независимость данных и правил их отображения, позволяющих выполнять обновление данных без необходимости их повторной регистрации в системе и задания настроек отображения

- сопоставление данных в условных и мировых системах координат, что позволяет, например, проводить сопоставление данных по подземной и наземной части без необходимости хранить данные по подземной части в мировых системах координат, позволяющих однозначно установить положение объекта, то есть, не раскрывая его местоположение при передаче данных о подземной части третьей стороне. В пакетах геологического моделирования такая возможность, как правило, отсутствует: все работы в одном проекте ведутся в единожды заданной системе координат, не подлежащей изменению. В графических редакторах понятие системы координат в традиционном понимании отсутствует

- векторизация растровых данных, в некоторых системах - автоматическая

- поддержка типовых форматов и протоколов, характерных для пространственных данных, что позволяет напрямую читать файлы, подключаться к базам данных и картографическим сервисам, например, репозиториям геологических карт (Рисунок 22)

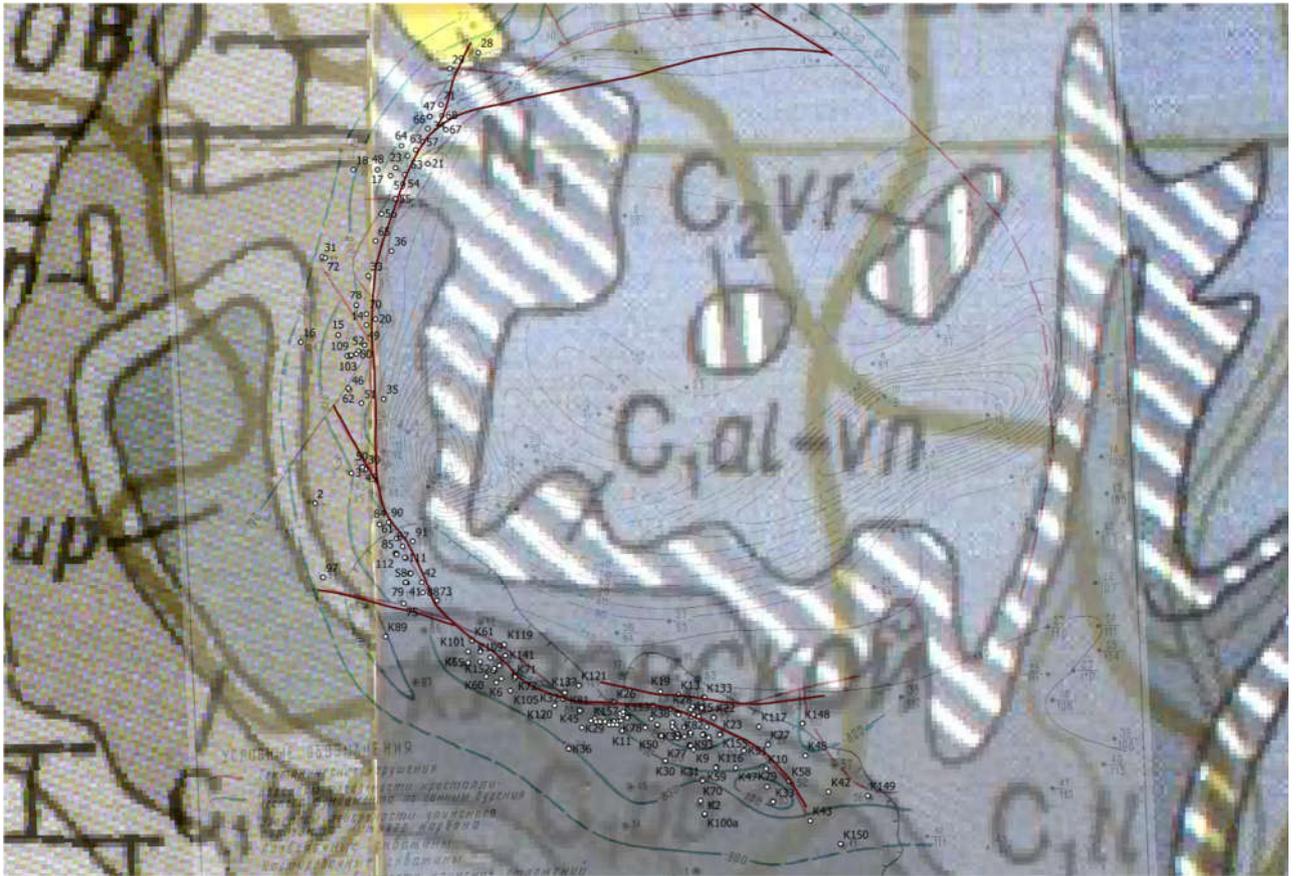


Рисунок 22 – сопоставление структурных построений одного из авторов и геологической карты, доступной по протоколу WMS в рамках проекта OneGeology

- поддержка типовых форматов, характерных для данных из пакетов геологического моделирования, либо возможность загрузки этих данных после предварительной конвертации формата файлов

- богатые оформительские возможности, позволяющие заданием набора правил гибко задавать параметры отображения объектов, стили их отрисовки (цвет, толщина линии, подписи) (Рисунок 23). Возможность применять существующие правила отрисовки при обновлении объекта, либо копирование с объекта на объект. В отличие от пакетов геологического моделирования, где такие правила задаются вручную индивидуально, и графических редакторов, где настройки отображения задаются вручную для подобъектов. При этом, при необходимости редактирования подобъектов, например при подготовки карт, существует возможность экспорта подготовленного макета в векторном формате для ручной доводки в графическом пакете

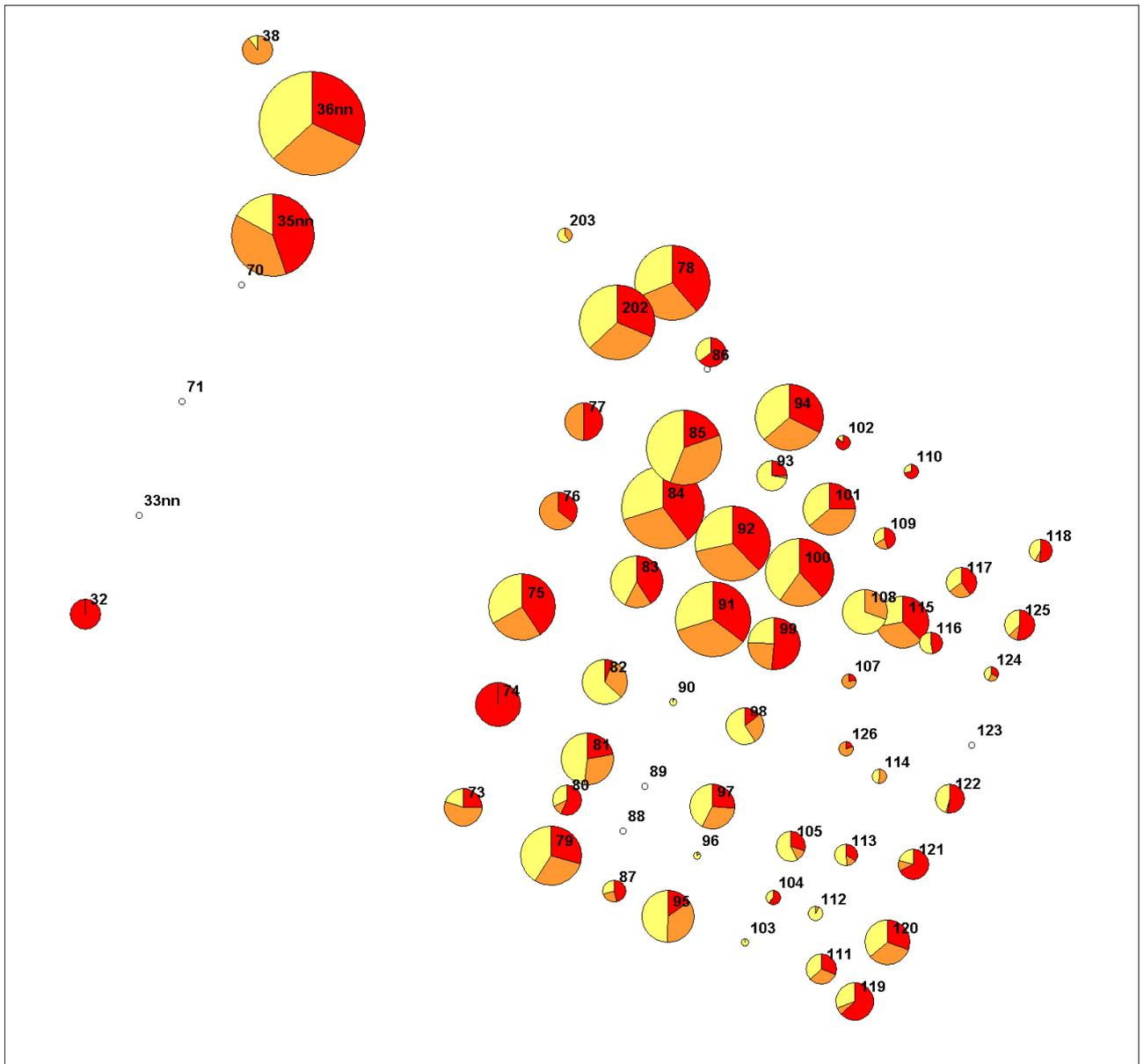


Рисунок 23 – автоматизированная визуализация объектов по заданному правилу, управляемая значениями их атрибутивных данных

- инструменты для пространственного анализа данных: расчёт границ зон влияния на основе буферных зон, полигонов Вороного, выпуклой оболочки, и их запись в виде отдельных объектов, возможность проведения арифметических, логических, геометрических, статистических и других операций над объектами, задания их более сложных комбинаций, в том числе с вычислением всех параметров по каждому из подобъектов и записью результатов в виде новых объектов (Рисунок 24). Оценка площадей, расстояний, возможность автоматической записи измерений по всем объектам без необходимости выполнения последовательности ручных измерений. В пакетах геологического моделирования подобные возможности присутствуют в существенно менее развитой форме и вовсе отсутствуют в графических редакторах

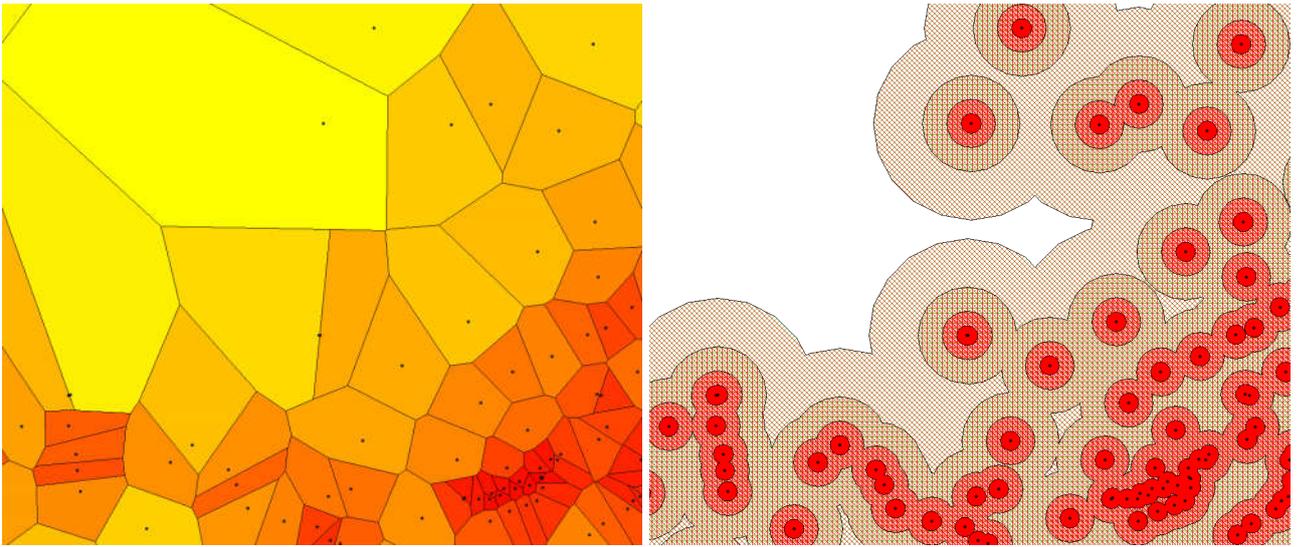


Рисунок 24 – зоны информационного влияния скважин на основе полигонов Вороного (слева) и буферных зон (справа)

Проведение работ по анализу данных в геоинформационных системах позволяет комплексно анализировать любые пространственные данные по объекту, полученных начиная с этапа поисково-разведочных работ до настоящего времени. Например, в рамках объектного мониторинга совместно с материалами ГИС-контроль могут накапливаться результаты площадных геофизических исследований, площадных и скважинных геохимических исследований, различные промысловые данные и результаты гидродинамических исследований в скважинах, данные ДЗЗ и т.п.

Использование геоинформационных системах позволяет автоматизировано выполнять целый ряд научно-практических задач:

- анализ геолого-геофизической изученности объекта (района), сопоставление данных из различных источников, включая различные авторские построения, данные ДЗЗ и результаты их обработки и тематического дешифрирования [56, 77], результаты геологического моделирования, данные из онлайн-репозитория картографической информации и т.п. (Рисунок 25)

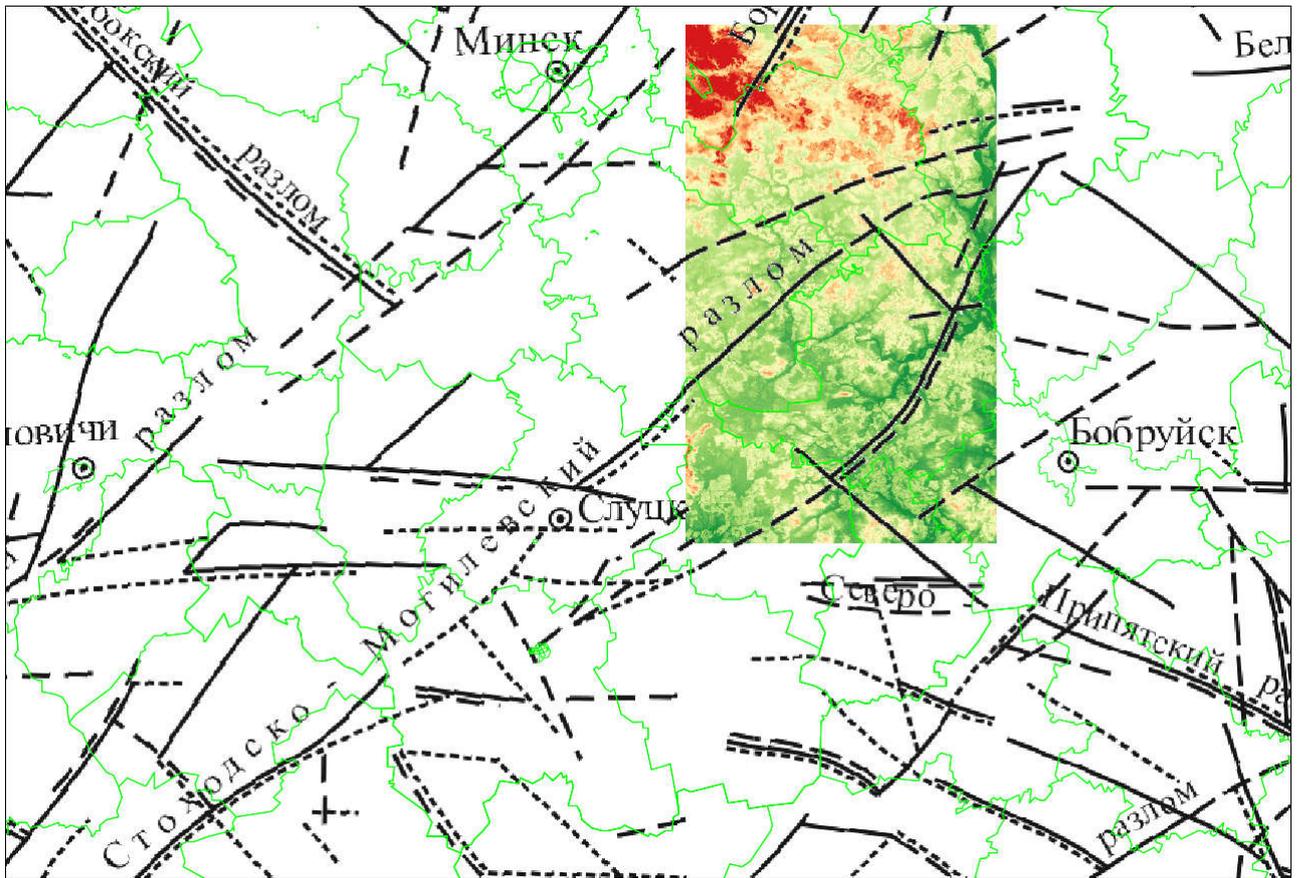


Рисунок 25 – сопоставление тектонической схемы из литературного источника и данных цифровой модели местности SRTM

- увязка и взаимная проверка картографических материалов разных лет и авторов, оценка имеющихся погрешностей и их устранение (Рисунок 26). В частности могут быть эффективно устранены искажения, связанные с использованием при построении архивных карт проектных положений скважин, без учёта их фактических положений

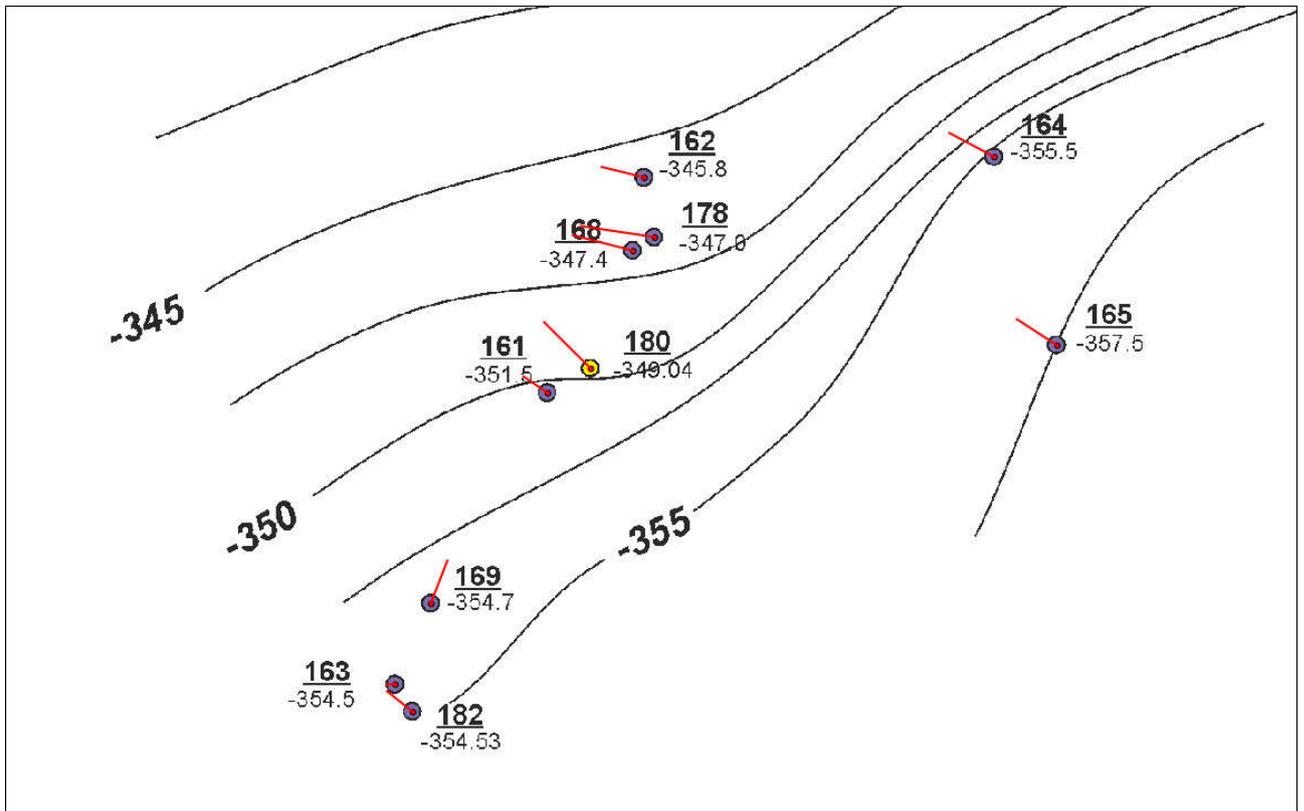


Рисунок 26 – распределение погрешностей отрисовки положения скважин на схеме одного из авторов, выявленное в ходе привязки данной схемы к фактическим положениям обозначенных на ней скважин. При необходимости выявленные погрешности могут быть устранены в результате привязки

- сопоставление картографических материалов разных лет и авторов без необходимости их векторизации (Рисунок 27) (для сопоставления векторных материалов, выполненных в единой системе координат, может быть эффективнее использование пакета геологического моделирования)

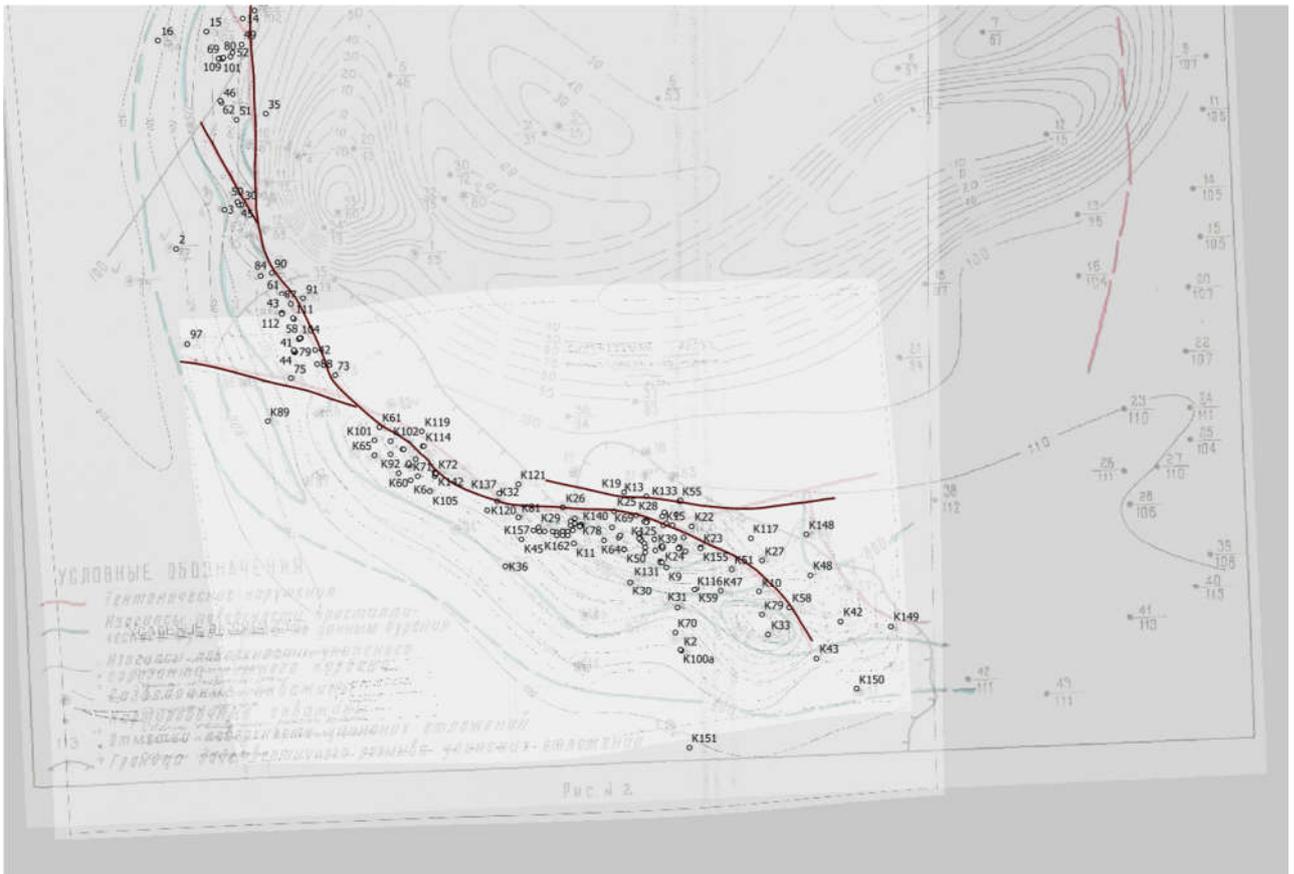


Рисунок 27 – взаимное сопоставление структурных построений различных авторов за различные годы после привязки данных материалов к фактическому положению скважин

- векторизация привязанных растровых материалов (сканов, фотографий), для дальнейшего использования полученных векторных данных при геологическом моделировании. Возможность совместной работы с системой автоматической векторизации.

- определение приблизительного местоположения ликвидированных структурных и разведочных скважин, не числящихся на балансе ПХГ, и в связи с этим не снятых геодезической съёмкой (Рисунок 28). В дальнейшем прогнозные положения могут быть уточнены результатами полевых замеров

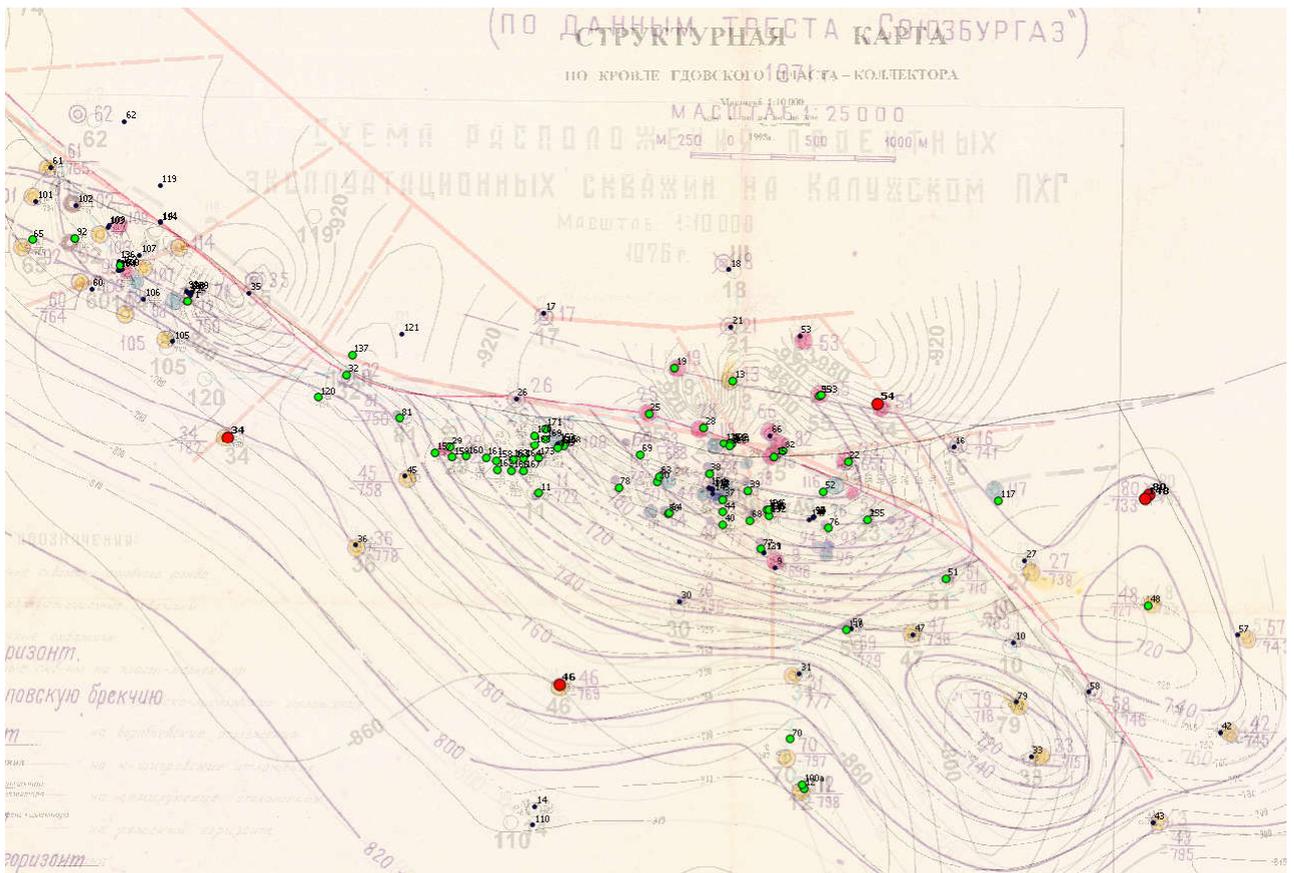


Рисунок 28 – восстановление положения ликвидированных скважин (отмечены красным) в результате сопоставления структурных построений различных авторов за различные годы после привязки данных материалов к скважинам с известным положением (отмечены зелёным и чёрным)

- ведение базы пространственных данных: отображение в графической форме всех пространственных данных, растровых и векторных, точечных, линейных и площадных, с указанием их системы координат, места расположения файла на накопителе. Возможность их взаимного сопоставления, регистрации новых данных

- подготовка данных для геологического моделирования: приведение материалов к единой системе координат, привязка и векторизация растровых данных (автоматическая векторизация может требовать применения внешних модулей)

- проектирование работ по доразведке: положение профилей или участков проведения полевых геофизических и геохимических исследований, скважин для проведения скважинных геофизических и геохимических исследований (Рисунок 29). Оценка расстояний между ними, длин, площадей, подготовка схем проведения работ, выдача положения проектируемых профилей или участков проведения работ в требуемой системе координат

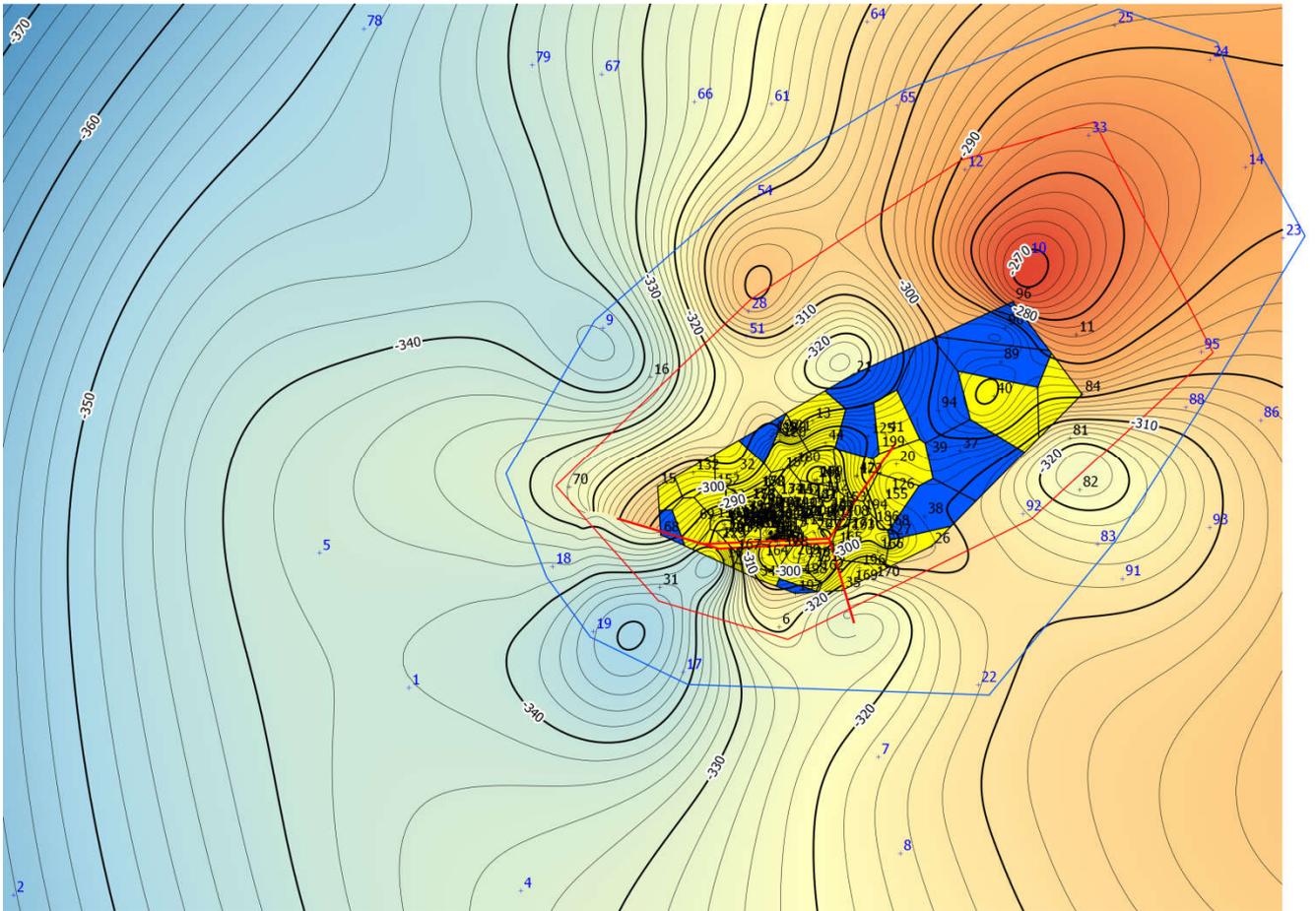


Рисунок 29 – анализ эффективности проведения геофизических работ на основе анализа динамики газонасыщенности скважин (зоны влияния скважин отмечены жёлтым и синим) и структурных отметок по скважинам

- проектирование буровых работ: анализ ландшафтных условий, оценка близости от техногенных объектов (других скважин, дорог, построек), при необходимости – прокладка кратчайшего маршрута до точки по дорожной сети. Хотя проектирование непосредственно ствола скважины эффективнее производить в пакете геологического моделирования или пакете анализа разработки, особенно в случае наклонно направленного и горизонтального бурения, полноценные инструменты комплексного анализа скважина-поверхность в данных пакетах отсутствуют

- подготовка различных схем, карт, в том числе и со сложным оформлением, как для использования в электронном формате, так и печатных макетов. Макеты карт могут обновляться при обновлении непосредственно данных (отдельные операции могут требовать применения внешних модулей).

1.2 Принципы разработки и распространения программных продуктов

Современные программные продукты геологического моделирования и геоинформационные системы являются настолько сложными системами, что самостоятельная их разработка в большинстве случаев нерациональна, гораздо более эффективным является построение системы из уже существующих на рынке программных комплексов и отдельных модулей. Для эффективного решения данной задачи необходимо предварительное изучение текущего состояния рынка соответствующего ПО и перспектив его развития.

Как показывало первоначальное изучение автором данного вопроса [24, 28], основными наиболее значимыми факторами, позволяющими классифицировать программные продукты, является выбранный тип лицензирования, согласно которому ведётся разработка и распространение программного продукта. Основными типами лицензий являются свободные и собственные (закрытые, проприетарные). При проприетарной модели разработки все права на программный продукт принадлежат компании-правообладателю, в большинстве случаев владеющей также коллективом разработчиков программного продукта и ведущей его разработку. Пользователю предоставляется лишь ограниченный круг прав на использование конечного программного продукта, декларируемый пользовательским соглашением (EULA, end-user license agreement). Доступ предоставляется как правило на платной основе, хотя в отдельных случаях возможно бесплатное или условно бесплатное распространение, и другие гибридные формы оплаты, например бесплатное распространение только базовой версии с ограниченной функциональностью, демонстрационной версии с ограниченным сроком работы, версии, законное использование которой разрешено только для личного некоммерческого использования и т.п. При этом пользователь не имеет возможности изучить исходный код программы, удостовериться в его корректной работе, самостоятельно исправить ошибки или внести необходимые ему улучшения. В большинстве случаев исходный код с программой не распространяется, а лицензионное соглашение явным образом запрещает декомпиляцию программы для изучения её внутреннего устройства. В отдельных редких случаях, когда исходный код всё же предоставляется покупателю, его копирование и распространение третьим лицам запрещается. Копирование и распространение программы в большинстве случаев также запрещены. Для защиты от копирования и нарушения целостности программы могут встраиваться различные программные и программно-аппаратные средства защиты, зачастую затрудняющие работу даже законным пользователям, потребляя часть ресурсов вычислительной машины, снижая стабильность работы операционной системы и отдельных прикладных программ, осложняя перенос одной приобретённой лицензии с одного физического рабочего места на другое.

Для достижения большей степени защиты, помимо продажи программ, то есть предоставляются их в бессрочное пользование, существует форма их предоставления, предлагающая только их аренду, то есть право на временное использование в течение ограниченного срока. После истечения указанного срока программа становится неработоспособна, вынуждая пользователя вновь и вновь продлевать срок аренды. Хотя единовременная аренда, как правило, обходится дешевле, чем единовременная покупка ПО, в долгосрочной перспективе она становится существенно более затратной, накладывая при этом риски потери работоспособности арендуемого парка ПО, например, при прекращении развития производителем данного программного продукта, его разорении или других непредвиденных обстоятельствах. В случае покупки лицензии у покупателя остаётся пусть устаревшая, но полностью работоспособная версия ПО, однако при прекращении срока аренды весь парк арендуемого ПО становится неработоспособен, что зачастую означает также потерю доступа ко всем наработкам, созданным с его использованием и хранящимся в закрытых форматах данного ПО.

Для достижения ещё большей степени защиты, в последнее время производители предлагают так называемую облачную форму предоставления ПО, когда пользователю вообще не передаётся какого-либо программного продукта, а предоставляется только удалённый доступ к нему, при этом программный продукт расположен на вычислительных мощностях компании-продавца. Помимо того, что доступ к таким услугам в любое время может быть прекращён, например, по политическим соображениям, такой способ работы вызывает много сомнений по поводу конфиденциальности обрабатываемых данных, поскольку с точки зрения пользователя, он доверяет хранение и обработку своих данных сторонней компании, получая от неё лишь конечный результат. В ряде областей, где непосредственно данные не имеют большой экономической и политической значимости, такой подход в течение нескольких последних лет активно применяется. В современной российской нефтегазовой отрасли, несмотря на отдельные предложения некоторых компаний, в настоящее время такая форма предоставления ПО всерьёз не рассматривается.

Таким образом, все существующие формы распространения собственного ПО направлены в первую очередь на защиту от пользователя и обеспечения механизмов получения от него денежных средств, которые могут идти в том числе и на дальнейшую разработку предлагаемого программного продукта.

В отличие от собственной формы разработки и распространения ПО, свободные лицензии, предлагают принципиально отличающийся подход к разработке и распространению программного обеспечения. Лицензия при таком подходе не ограничивает свободу конечного пользователя, а, наоборот, декларирует её, гарантируя свободу использования, изучения

исходного текста, распространения и модификации программ, и, в то же время, защищая юридические права авторов произведения. Программное обеспечение, развиваемое под свободными лицензиями, называют свободным. Концепция свободного программного обеспечения (СПО), противопоставленная концепции собственного ПО и лишенная присущих ей недостатков, была предложена Ричардом Столлманом (Richard Matthew Stallman) в 1985 году [86]. К настоящему времени концепция СПО завоевала широкое международное признание, позволив решить принципиальные проблемы, препятствовавшие инновационному развитию областей деятельности, связанных с использованием ПО.

При использовании свободных лицензий, принципы разработки программного продукта становятся аналогичны принципам ведения научного исследования. По этой причине такой подход становится крайне эффективным при создании сложных систем, требующих для разработки и отладки больших трудовых ресурсов, которые один автор или небольшая группа авторов при закрытом типе разработки продукта обеспечить не может. Особенно эффективным подобное коллективное взаимодействие стало с развитием глобальных сетей, в первую очередь, Интернет. Другими преимуществами концепции СПО является существенно более высокая безопасность массово используемых программных продуктов из-за возможности многократных проверок всеми заинтересованными специалистами исходного кода программ, отсутствие монопольного контроля над разработкой, открытость информации об известных ошибках и недоработках, направленность на получение максимально совершенного продукта, а не максимальной прибыли.

Существуют различные свободные лицензии, отличающиеся своими требованиями: есть лицензии, защищающие полную свободу продукта и всех его производных, есть - позволяющие использовать полученный свободный продукт даже внутри закрытых проектов; есть лицензии, требующие сохранения готового свободного произведения в неизменной (авторской) форме. Есть лицензии, требующие обязательного указания всех авторов во всех производных продуктах, есть лицензии, не предъявляющие таких требований [89]. В любом случае, использование свободных лицензий не подразумевает отказа от авторства, а выпуск продукта под свободной лицензией, напротив, может использоваться как шаг для защиты авторских прав.

Вопрос свободы программного обеспечения тесным образом связан с вопросом его открытости и бесплатности. Действительно, одна лишь открытость исходного кода ещё не является гарантом свободы программы, поскольку в случае несвободного распространения, автор вправе навязывать свои условия её использования, например, требование оплаты или применения только для некоммерческих целей, необходимость просмотра рекламы или невозможность модификации исходного кода и т.п. Кроме того, существует значительное количество бесплатных, но несвободных продуктов. Пользователь в данном случае выступает в

роли бесплатного тестера, а производитель остаётся вправе, начиная с любой новой версии, сделать программу платной, прекратить её развитие, как угодно изменить её по своей прихоти. В отличие от этих моделей распространения, свободное ПО подразумевает не только открытость, но и свободу распространения исходного кода, что даёт возможность бесплатного, любым лицом и для любых целей, получения копии программы. Программа может собираться пользователем самостоятельно из исходного текста, либо распространяться в виде готовых пакетов, скомпилированных для той или иной аппаратной платформы и операционной системы. Даже если разработчик прекратит развитие программы, сам проект сохранит своё существование и в будущем сможет быть продолжен другими авторами, что обеспечивает практическую невозможность гибели свободных проектов. В то же время, свободная модель распространения не запрещает получения прибыли от продажи ПО, но, поскольку в данном случае исходные тексты являются общедоступными, это является разумным только в некоторых ситуациях. Так, например, данный подход может быть эффективен в случае продажи программ вместе с услугами внедрения, поддержки и сопровождения, продажи сборников программ, где подразумеваются трудозатраты на формирование уникальной подборки, продажи откомпилированных версий до момента их появления в свободном доступе, что может быть актуально для экзотических аппаратных платформ и операционных систем.

1.2.1. Место свободного ПО в современном мире

В настоящее время существующее свободное ПО охватывает практически все сферы человеческой деятельности, требующие использование ресурсов ЭВМ [17]. Существуют как программные продукты общего назначения, так и специализированные решения, например, промышленно используемые системы управления базами данных и средства визуализации и анализа геологической информации (Рисунок 30, 31).

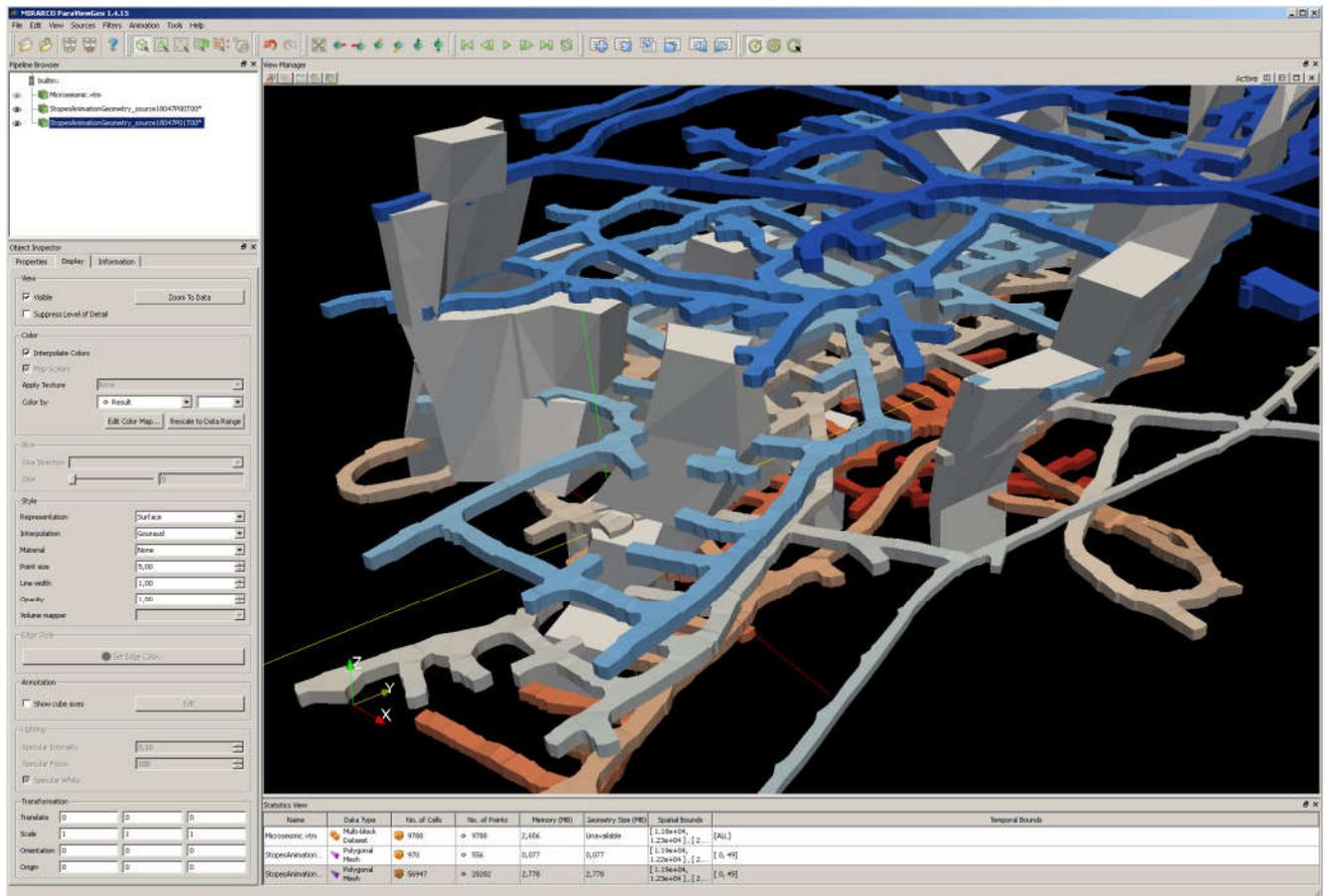


Рисунок 30 – четырёхмерная (трёхмерная динамическая) модель системы горных выработок в среде ParaViewGeo

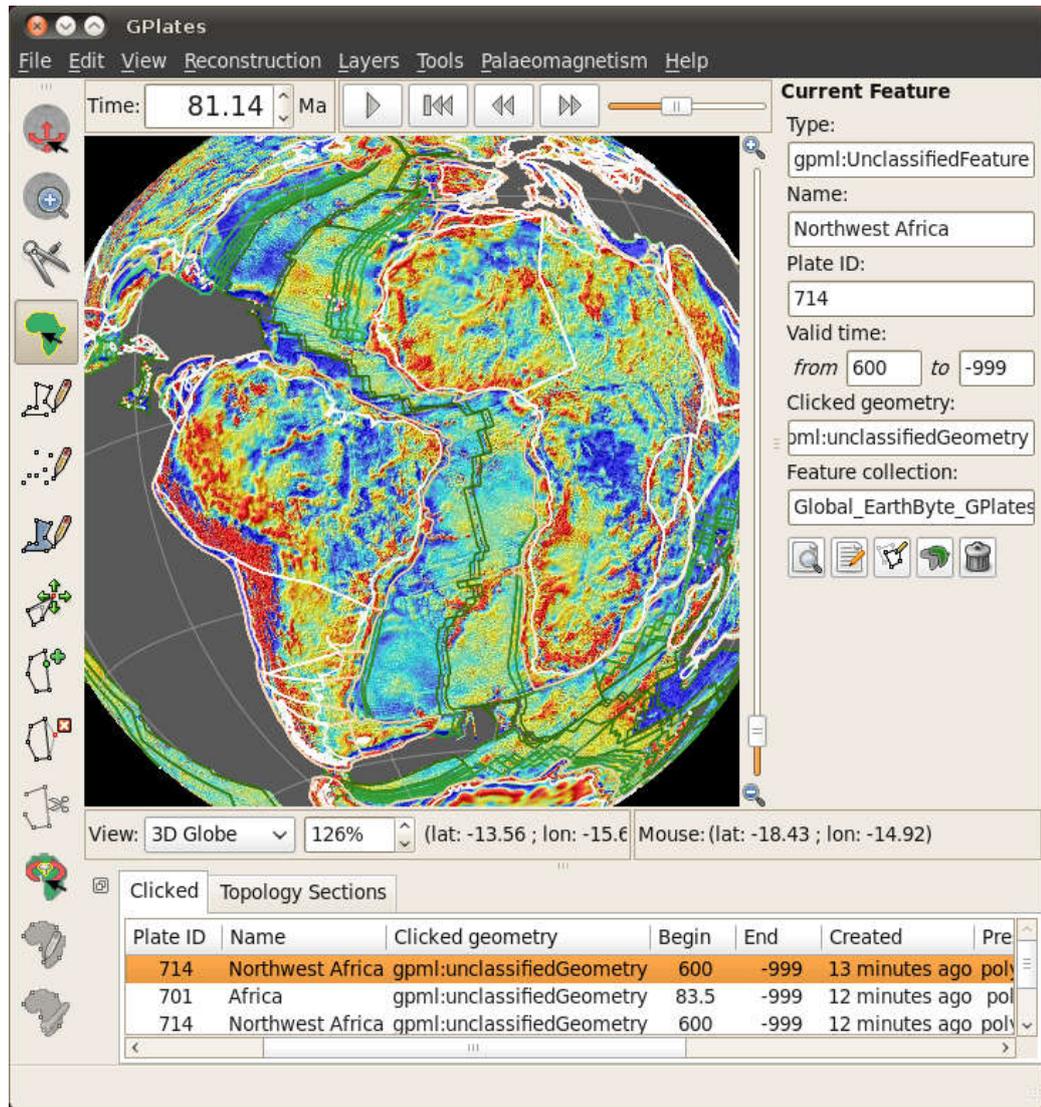


Рисунок 31 – совместная визуализация динамической геотектонической модели и современных гравиметрических данных в программной среде GPLates [91]

Многие свободные проекты из самых различных предметных областей уже давно заняли и с тех пор удерживают лидерские позиции в своих областях. Так, например, на ноябрь 2015 года 494 систем из списка «Топ 500» – регулярно обновляемого списка пятисот наиболее производительных систем мира - работает под управлением свободной ОС GNU/Linux [92].

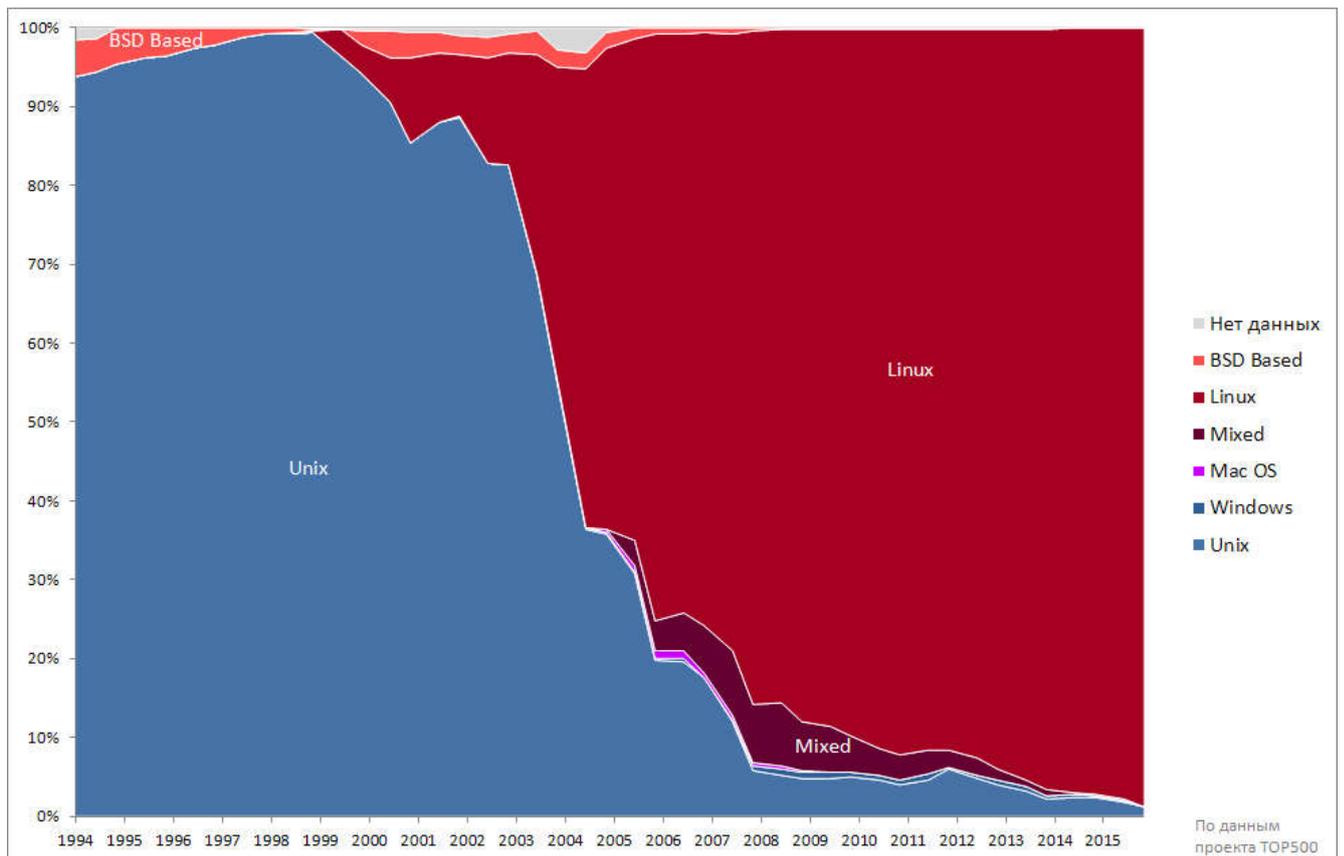


Рисунок 32 – Динамика распространённости различных ОС среди пятиста наиболее высокопроизводительных суперкомпьютеров мира, по данным проекта TOP500

Общая доля систем, реализованных на базе GNU/Linux и построенных на базе GNU/Linux систем – таких как Android, Ubuntu, MeeGo, HP webOS и др. – также весьма существенна (Рисунок 33).

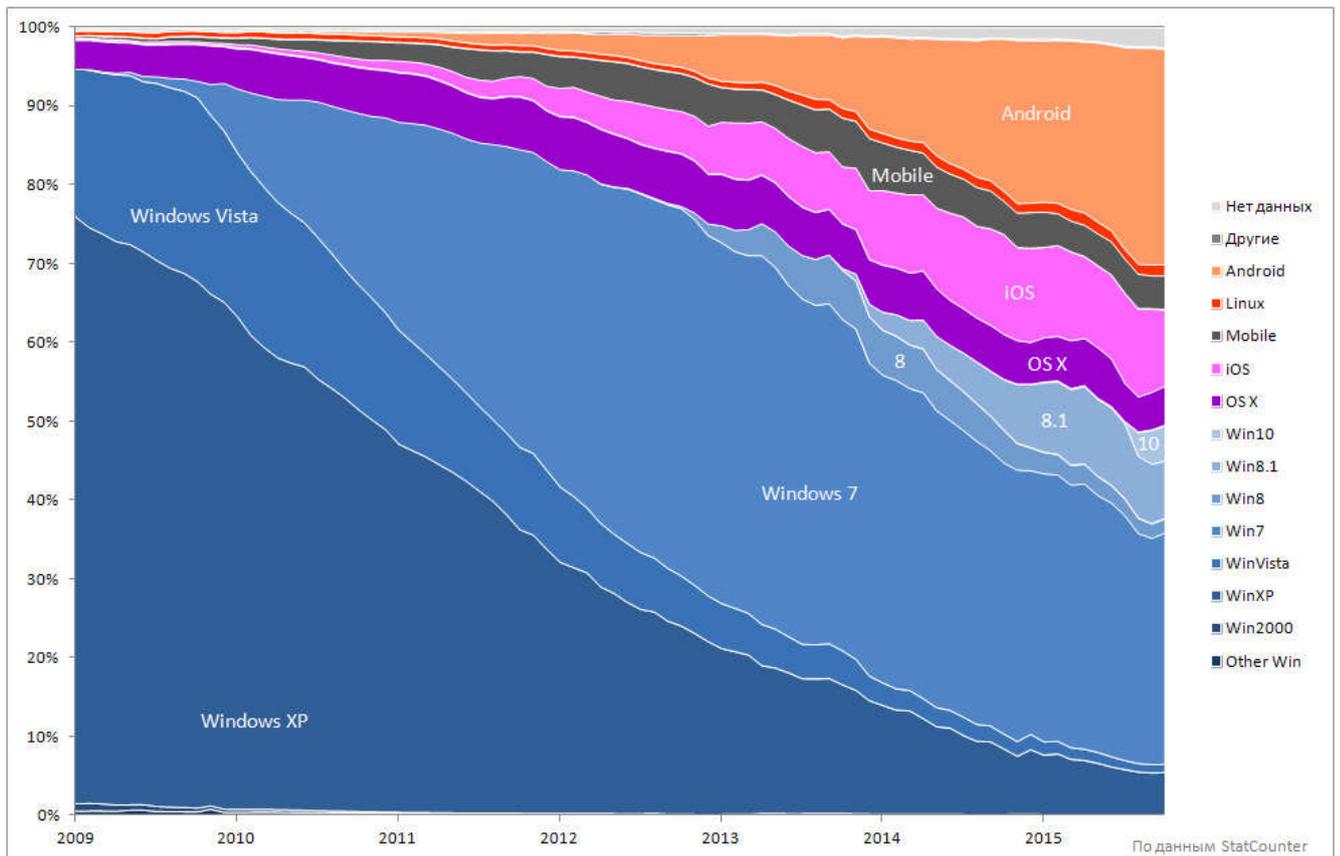


Рисунок 33 – Общая динамика распространённости различных ОС по данным StatCounter для всех типов устройств, включая персональные компьютеры и мобильные устройства

В качестве других успешных примеров можно привести примеры таких проектов можно привести: Firefox, Chromium – среди Интернет-обозревателей, PostgreSQL, MySQL – среди систем управления базами данных, Blender – среди пакетов трёхмерного моделирования и визуализации, Inkscape, Krita, GIMP– среди универсальных графических редакторов, GRASS GIS и Quantum GIS – среди геоинформационных систем, R – среди систем анализа данных, LibreOffice – среди универсальных офисных пакетов, ImageJ – среди систем анализа и обработки изображений, LaTeX – среди систем вёрстки научных статей и сложных документов, ParaView и ParaViewGeo – среди систем визуализации многомерных научных данных, GPLates – среди систем работы с геотектоническими данными.

Идею СПО приняли на вооружение государственные структуры многих стран, как беднейших, так и наиболее развитых. СПО широко применяется в правительственных учреждениях США (активнее всего – в министерстве обороны, затем – в министерстве энергетики) [90]. Активно поддерживается концепция СПО правительством Индии [93]. 1 июля 2011 года правительство Бразилии подписало соглашение о намерениях, в рамках которого планируется непосредственное участие в разработке свободных офисных пакетов LibreOffice и OpenOffice.org, масштабно использующихся в стране. Одна из популярных в настоящее время

свободных геоинформационных систем gvSIG возникла в 2004 году в рамках испанского государственного проекта, который состоял в полной миграции информационно-технологических систем регионального министерства инфраструктуры и транспорта Валенсии (Испания) на свободное программное обеспечение. Правительство Российской Федерации также присоединилось к инициативе использования СПО. Так, в марте 2008 года была опубликована «Концепция развития разработки и использования свободного программного обеспечения в Российской Федерации», разработанная Мининформсвязи, а распоряжением от 17 декабря 2010 г. № 2299-р Правительство РФ утвердило план перехода федеральных органов исполнительной власти и федеральных бюджетных учреждений на использование свободного программного обеспечения на 2011-2015 годы [87]. В образовательной и военной сферах разработка и использование СПО в России уже ведётся в течение ряда лет.

Использование свободного программного обеспечения избавляет от необходимости внедрения закрытых и постоянно изменяемых форматов хранения данных, стимулируя развитие открытых стандартов, форматов и протоколов предоставления данных. По аналогии с открытыми лицензиями на программное обеспечение активно развиваются открытые лицензии на аппаратное обеспечение и данные, стимулируя отдельных исследователей, исследовательские группы и крупные правительственные структуры к публикации наборов открытых данных, как правило, общедоступных и свободно распространяемых в электронной форме с соответствующих тематических электронных ресурсов.

Для активизации свободных научных исследований различными организациями создаются и распространяются свободные данные из самых различных областей знания (Рисунок 34), проводятся конкурсы и предоставляются гранты для свободных научно-исследовательских проектов, поощряется развитие свободного научного ПО. В свободном доступе публикуются видеозаписи учебных лекций, методические руководства, учебная литература, существуют специализированные форумы, где всегда можно получить консультацию более опытных товарищей. Существует значительный объём свободных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [94, 95, 96-97], топографических [98, 99] и геолого-геофизических данных [100], пригодных для проведения комплексных геолого-геофизических исследований.

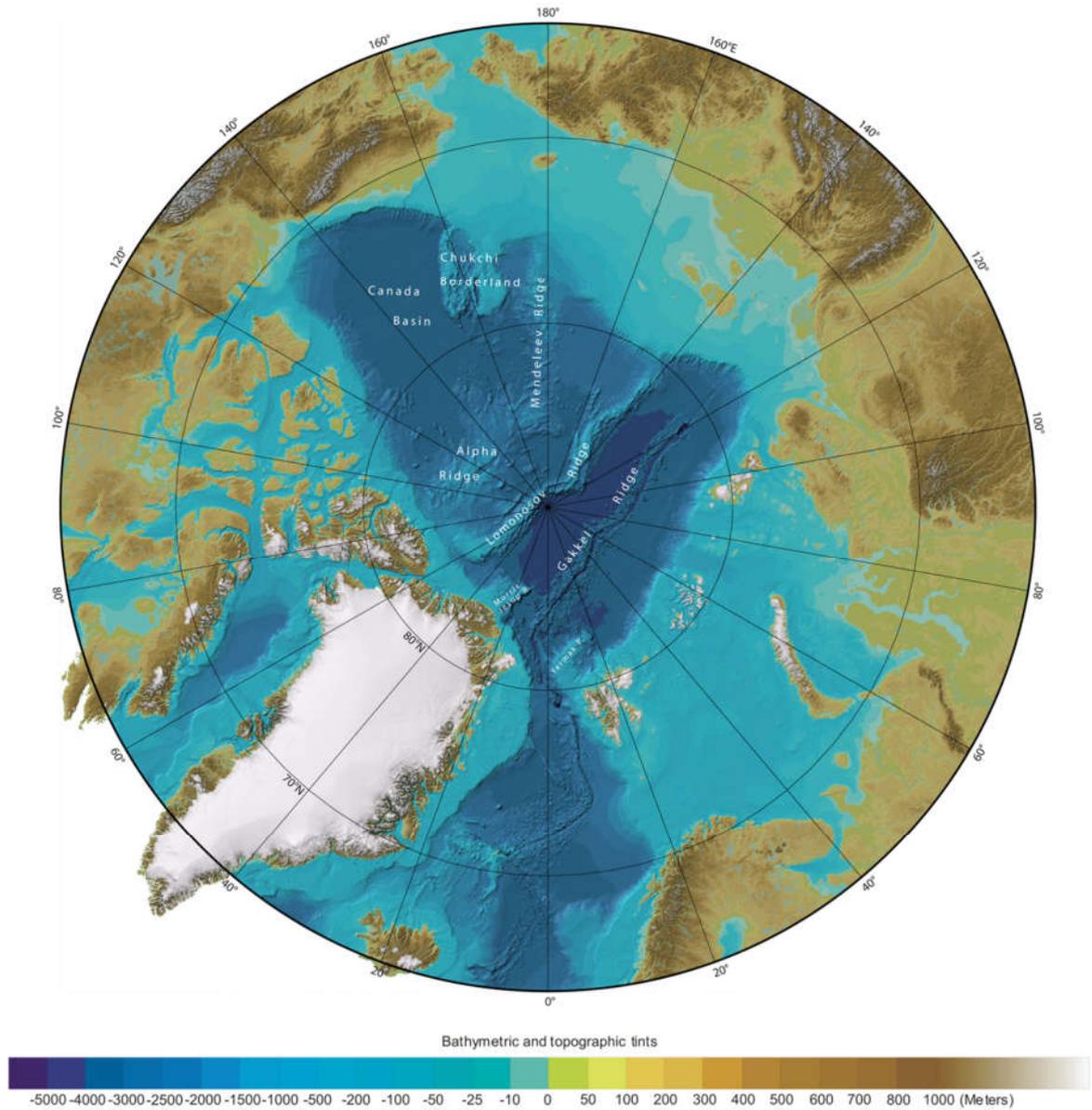


Рисунок 34 – Свободные данные батиметрии Арктики, созданные в рамках международного проекта IBCAO (International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean) [101]

В минимальном виде свободным ПО можно считать исходный код любой программы, для которого явно указана свободная лицензия, под которой он опубликован. Как правило, для удобства пользователей, помимо исходного кода предлагаются также готовые реализации программы, уже скомпилированные для тех или иных операционных систем и аппаратных архитектур, а также техническая документация. В большинстве случаев, текущая версия программы является лишь одним из её состояний, а программа в целом находится в непрерывном развитии. Одновременно может существовать сразу несколько веток программы, например, стабильная, тестируемая и несколько экспериментальных. Для коллективного ведения разработки используется система контроля версий и система отслеживания ошибок. У многих проектов существует официальная веб-страница, дающая базовое представление о

проекте, содержащая ссылки для загрузки программы, исходных текстов и документации, а также ссылки на основные информационные источники. Это может быть официальный форум продукта, тематическая документация в формате wiki, страницы смежных проектов. Активные участники сообщества могут иметь свои собственные тематические веб-ресурсы, участвовать в жизни независимых тематических сообществ.

Поскольку мотивация энтузиастов к совершенствованию свободного продукта в значительной степени основана на социальных механизмах, неотъемлемой составляющей любого успешного проекта является активное свободное сообщество. Для взаимодействия участников сообщества могут использоваться как форумы, так и различные системы обмена мгновенными сообщениями, списки почтовой рассылки, в некоторых случаях – личное общение, например, на тематических конференциях.

Параллельно с сообществом в развитии проекта может участвовать одна или несколько коммерческих компаний. Как правило, такие компании получают прибыль от продажи услуг технической поддержки, внедрения, разработки специализированных инструментов, обучения, помощи в выполнении проектов с использованием развиваемого ПО. Не существует никаких ограничений для вхождения новых компаний на данный рынок, однако наибольший авторитет имеют компании, обладающие значительным опытом разработки данного продукта или содержащие на постоянной основе ключевых программистов, развивающих данный продукт и в совершенстве знающих нюансы его работы. Одновременно такие люди могут являться активными участниками и даже лидерами свободного сообщества, что идёт лишь на пользу проекту в целом.

Ключевое отличие жизни свободного ПО заключается в привлечении к его созданию и совершенствованию свободного сообщества. Получаемый программный продукт развивается, адаптируясь под нужды конкретных пользователей, и при этом остаётся общественным достоянием, защищаемым свободной лицензией.

Поскольку все участники оказываются заинтересованными в наиболее эффективном развитии продукта, активно ведётся тестирование ПО, выявление, отслеживание и исправление ошибок. Коллективностью работы сообщества обеспечивается стабильность, безопасность, производительность программ. Поскольку продукт является результатом коллективного труда, заведомо обеспечивается соответствие продукта ожиданиям и потребностям пользователей, при развитии больших проектов происходит корректная расстановка приоритетов развития, обеспечение рациональности ПО, удобства его использования. Для большей объективности, время от времени во многих проектах проводятся голосования: какие направления развития проекта пользователи видят более востребованными, каких функций не хватает, какие

нуждаются в доработке. Отсутствие зависимости разработки программы от бизнес-процессов снимает ограничения для внедрения новых и экспериментальных методик, которые, как правило, первоначально тестируются в специализированных ветках проекта, и, в случае успеха, включаются в состав основной ветви. В ходе работ ведётся унификация форматов, интерфейсов и процедур, что является не менее важным результатом, чем разработка непосредственно ПО, поскольку от них зависит совершенство внутреннего устройства программ, совместимость с общепринятыми стандартами и другими проектами.

В целом, общими чертами организации разработки программных средств или иных форм научного творчества силами свободного сообщества являются:

- Невозможность контроля процесса со стороны каких либо некоммерческих, коммерческих, государственных или иных структур или частных лиц
- Практическая реализация принципов меритократии. Невозможность удержания авторитета, не подкрепляемого продолжаемой работой
- Практическая реализация принципов самоорганизации. Выработка правил взаимодействия и их корректировка происходит силами самого сообщества. Несогласные участники могут выйти из проекта, основав на базе существующего свой собственный или удалившись от дел
- Полная интернациональность
- Допустимость анонимности участников процесса

Идея СПО запустила революционные реформы общества, предлагая принципиально новый подход к общественному и научному взаимодействию (Рисунок 35). Простота вхождения и открытость информации обеспечивают вовлечение энтузиастов и упрощают взаимодействие между проектами, ведёт к выработке новых идей, давая неограниченные возможности личного и научного роста для активных участников. Расширяющееся взаимодействие между различными свободными проектами, в том числе и из существенно различных предметных областей, порождает обмен знаниями, вовлекая в процесс взаимодействия специалистов из смежных и несмежных отраслей. Привлечение внимания широкой общественности к проблемам стандартизации и их коллективное решение способствует постепенному переходу от узких коммерческих и отраслевых стандартов к универсальным и общеупотребимым. Общение участников сообщества и процесс разработки приобретают интернациональный характер (Рисунок 36), обеспечивая объективность оценки общемировой ситуации и независимость от интересов локальных монополистов.

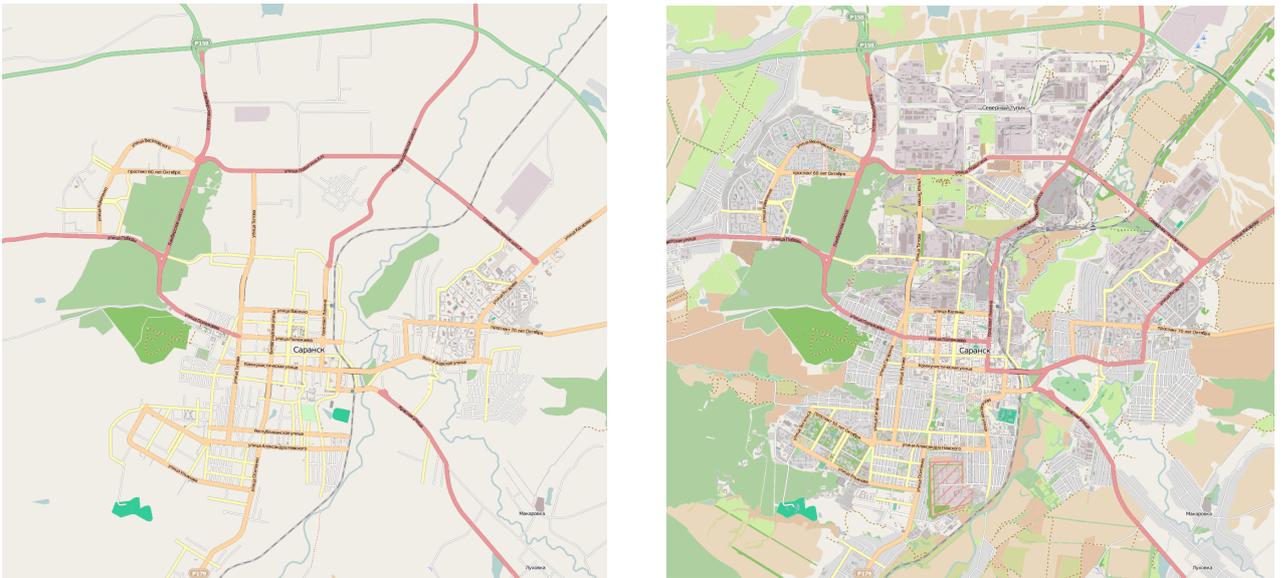


Рисунок 35 – в ходе первой российской «online mapping party» детальная карта 300-тысячного города Саранск была создана участниками свободного проекта OpenStreetMap всего за 50 часов [102]. Слева – до, справа – после проведения мероприятия. Одних только строений оцифровано порядка 17000

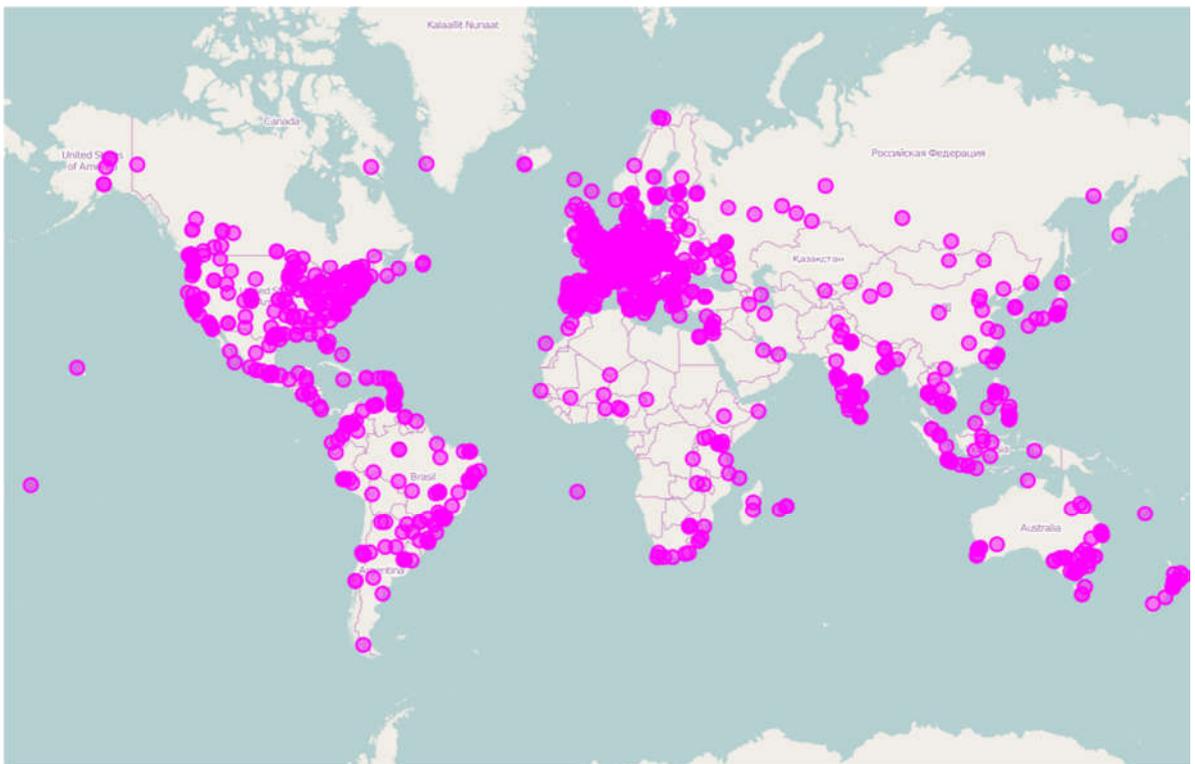


Рисунок 36 – местонахождение разработчиков проекта Quantum GIS, указавших координаты своего положения на январь 2016 года [103]

Эволюционные и социальные принципы развития делают свободные проекты очень сильными. Это обеспечивается целым рядом факторов. Поскольку активные участники

сообщества сами расставляют приоритеты развития своих проектов, неудачные решения со временем отмирают. Свобода самовыражения, как в виде идей, так и в виде их реализации, и товарищеская поддержка позволяют активным проектам развиваться темпами, недоступными для закрытых разработок. Внутренняя конкуренция между однотипными проектами добавляет атмосферу соревновательности, важную для обеспечения активности некоторых разработчиков. Отсутствие риска потери проекта позволяет даже самым осторожным авторам полностью вкладываться в его развитие.

В то же время, поскольку активность разработки открытых проектов напрямую зависит от активности сообщества, существует ряд факторов, способных замедлить их развитие. Это может происходить, если цели сообщества малопонятны, неудачно выбрана лицензия разрабатываемого продукта, слишком узка целевая ниша, один автор или группа авторов пытается навязывать свои решения, из-за отсутствия в сообществе ярких идейных или харизматичных лидеров, либо катастрофического отставания от конкурирующих проектов (хотя при благоприятном стечении остальных факторов это, напротив, может стать дополнительным стимулом развития).

В настоящее время, несмотря на существующий интерес ряда участников, какой-либо крупной информационной площадки, посвящённой свободным решениям в области геологии и геофизики, в сформированном виде всё ещё не существует. Особенно острой ситуация становится, если рассмотреть только русскоязычный сегмент общества, поскольку количество русскоязычных информационных источников крайне невелико. В то же время, в областях знания с уже сформированными активными русскоязычными сообществами, например в области геоинформационных технологий, ситуация обстоит значительно более успешно (Рисунок 37).

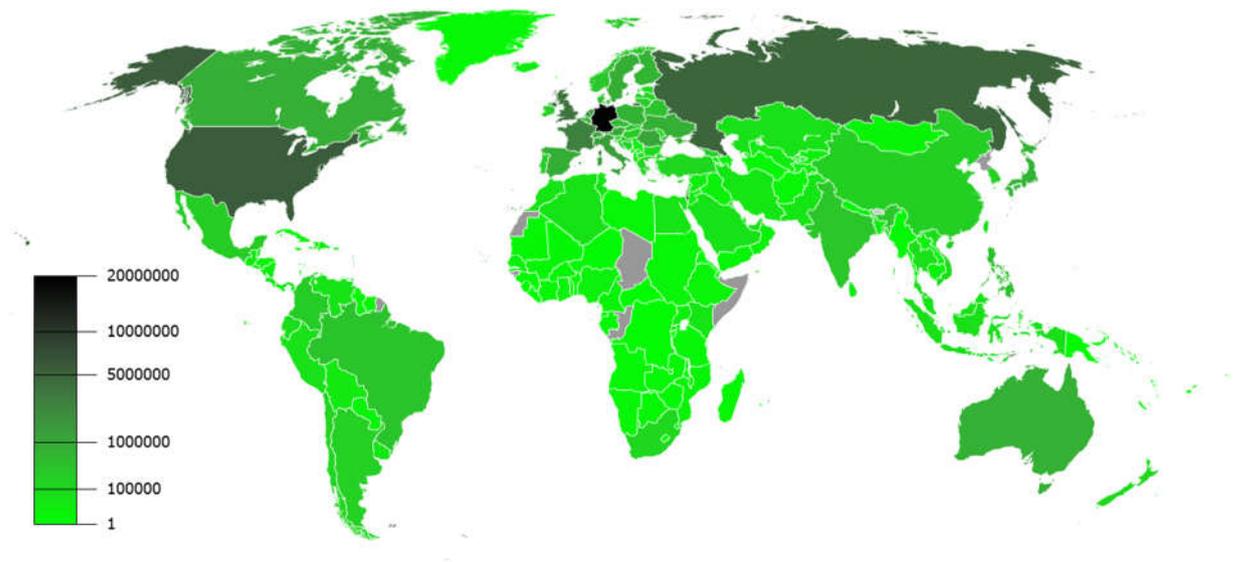


Рисунок 37 – Статистика использования OpenStreetMap в различных странах мира на февраль 2011 года [104]. Чем темнее, тем активнее использование

Для выхода из сложившейся ситуации, неблагоприятной для развития отечественной нефтегазовой отрасли, необходимо форсировать формирование свободного сообщества геолого-геофизической направленности. В качестве «центра кристаллизации» может выступать Интернет-форум со свободной и доброжелательной атмосферой, независимый от существующих коммерческих компаний-разработчиков несвободного ПО, возможны также варианты на основе сайта или блога. Инициативная группа может существовать как в виде зарегистрированного некоммерческого общества, так и в виде свободного сообщества. Помимо сетевого взаимодействия, необходимо проведение регулярных специализированных семинаров, тематических встреч. Эффективным средством может стать создание секции в рамках какой либо научно-практической конференции, посвящённой свободным решениям в области геологии и геофизики, а в дальнейшем, проведение специализированных конференций по данной тематике.

1.2.2. Концепция СПО с экономической точки зрения

Несмотря на кажущийся альтруистический подход, концепция СПО показала свою состоятельность и с экономической точки зрения. Хотя в рамках идеи СПО родилось множество сильных проектов, ряд продуктов был целенаправленно переведён в разряд свободных из числа первоначально закрытых разработок, в том числе и крупными игроками, желающими владеть ситуацией. Резкое увеличение пользовательской базы, происходящее из-за перевода программного продукта в статус свободных, может быть использовано с целью повышения популярности его компании-производителя, либо для получения прибыли от

внедрения и поддержки продукта, продажи учебных материалов (видеокурсов, электронных книг, печатной продукции), проведении учебных занятий, консультаций, доработке продукта под нужды пользователя. Простота осуществления Интернет-платежей в наиболее развитых странах делает эффективной систему пожертвований, в рамках которой порой удаётся собрать весьма серьёзные суммы. Применяется как система традиционных пожертвований в фонд проекта, так и целевых пожертвований, когда собирается заранее оговорённая сумма для реализации той или иной функции. По достижении данной суммы (иногда раньше) начинается работа, а по её завершении, труд авторов вознаграждается собранными средствами.

Хотя идущий передел рынка невыгоден крупным монополистам, лишаящимся привычных сверхприбылей, процесс развития свободных продуктов в настоящее время принял настолько масштабный и повсеместный характер, что его, видимо, уже невозможно остановить. В данной ситуации игнорирование концепции СПО не является дальновидным решением. Идея, что разработка СПО - бесцельное вложение денег, нерентабельна и держится только на энтузиазме – вымысел, навязываемый игроками старой школы, чтобы скрыть свою неготовность адаптироваться к новым рыночным условиям. Ряд крупнейших компаний уже присоединился к инициативе СПО и активно её поддерживает. Несмотря на этап становления концепции СПО, некоторые компании уже добились серьёзных финансовых достижений.

Примечателен успех компании Red Hat, занимающейся разработкой, внедрением и поддержкой дистрибутива Linux, ориентированного на использование в корпоративном секторе (Red Hat Enterprise Linux). Бизнес, связанный с Linux является основным источником её доходов. В 2009 году компания была включена в список S&P500 пятисот самых успешных компаний США, ежегодный денежный оборот компании превышает 1 млрд. долларов США [105].

Таким образом, использование концепции СПО не исключает получение прибыли от разрабатываемых программных продуктов, ни для индивидуальных разработчиков, ни для крупных компаний, хотя применяемые для этого подходы и отличаются от используемых при собственнической модели разработки.

1.2.3. Риски, связанные с использованием несвободного ПО

У идеи несвободного ПО существует ряд принципиальных ограничений, не решаемых в рамках сложившейся системы взаимоотношений. Основной проблемой является вторичность роли самого ПО по сравнению с бизнес-процессами его разработчика. Поскольку главной движущей целью коммерческой компании является получение прибыли, гармоничное развитие конкретного программного продукта оказывается лишь побочным результатом этой

активности. Развитие закрытого продукта в любой момент может быть остановлено или перенаправлено согласно новой стратегии производителя, а сама компания может прекратить своё существование, быть куплена другой компанией, может продать или расформировать подразделение, занимающееся разработкой конкретного программного продукта, признав его разработку нерентабельной, или по каким-либо другим причинам. Производителю зачастую выгоднее добавлять престижные функции, чем совершенствовать уже существующие, а равнение на конкурентов препятствует творческому развитию закрытых проектов, способствуя шаблонности и неоптимальности применяемых подходов. Наличие ошибок, несовместимость форматов и версий, высокая ресурсоёмкость во многих случаях играют на руку производителю закрытого ПО, оправдывая продажу обновлений, услуги технической поддержки, и одновременно осложняя возможность перехода на продукцию других марок. Кроме того, зачастую несовместимость версий создаётся намеренно, с тем, чтобы стимулировать продажи новых версий программы. Подобным «грязным трюком» не стесняются пользоваться многие солидные компании-разработчики закрытого ПО, показывая и более мелким игрокам рынка, что такое поведение вполне нормально. В то же время, конечный потребитель в данной ситуации оказывается в весьма невыигрышном положении: коммерческое лицензионное соглашение оставляет его без прав, без гарантий на будущее, не давая при этом каких-либо выгод от нахождения в таком неудобном положении.

В данном аспекте, опасны не только коммерческие, но и бесплатные несвободные продукты. Длительное время такие продукты могут развиваться, оставаясь бесплатными, из-за чего приобретают достаточную популярность, однако, когда пользовательская аудитория уже сформирована, а большинство недоработок устранены, разработчики объявляют, что со следующей версии программа станет платной. В итоге, пользователям, потратившим свои ресурсы на изучение и отчёты об ошибках данного продукта, приходится отказываться от его дальнейшего использования. Так, например, произошло с популярной несвободной системой визуализации Indigo gender. Данный случай весьма наглядно иллюстрирует различие между свободным и бесплатным несвободным ПО, поскольку в случае свободного ПО такая ситуация заведомо невозможна.

В ряде случаев применение несвободных решений уже сейчас является неоптимальным. Индивидуальные исследователи и некоммерческие сообщества не заинтересованы в покупке платного ПО; в целях экономии средств и обеспечения безопасности даже коммерческие компании могут быть заинтересованы в полном или частичном переходе на СПО. Для государственного использования закрытые продукты слишком опасны, особенно зарубежные, производителей которых в случае возникновения непредвиденных обстоятельств заведомо невозможно будет привлечь к какой-либо ответственности. Кроме того, использование

закрытых продуктов в национальных масштабах ставит государство в зависимость от коммерческой компании, что является рискованным с политической и экономической точки зрения. Открытые системы являются существенно более удобными для образовательных целей, поскольку позволяют проводить их изучение не только на уровне интерфейса пользователя, но и на уровне исходных тестов. Для научных целей свободные продукты удобнее из-за возможности точно знать, каким именно образом осуществляется та или иная процедура, а не верить на слово разработчику, зачастую не желающему давать полную информацию о работе своих алгоритмов.

Иногда у пользователя ПО возникает потребность в разработке специфических инструментов под собственные нужды. Поскольку эта работа требует существенных трудозатрат, нужна гарантия, что базовое ПО, для которого создается расширение, продолжит существовать и в будущем. В случае свободного ПО такая гарантия имеется, однако разработчик коммерческого ПО всегда может разориться, быть куплен какой-либо компанией или самостоятельно принять решение о прекращении выпуска того или иного продукта.

Любое программное обеспечение может содержать ошибки. В большинстве случаев, разработчики закрытого ПО не берутся возмещать убытки от использования их продукта и даже не всегда могут гарантировать оперативное исправление ошибок. Зачастую, основным фактическим преимуществом становится доступ к технической поддержке продукта, однако если востребована именно данная услуга, то существует достаточное количество компаний, осуществляющих техническую поддержку и свободных продуктов.

Вопросы приемлемости использования закрытого собственного ПО для решения важных задач промышленности приобрели особую актуальность после 2010 года, когда была выявлена общемировая атака компьютерного червя «Stuxnet», изначально ориентированного на заражение защищённых промышленных объектов, даже не имеющих прямого доступа к внешним сетям и выведение из строя промышленного оборудования, используемого на установках по обогащению урана. Предположительно, основной целью его распространения являлось катастрофическое выведение из строя Бушерского ядерного реактора в Иране, однако заражение данным вирусом промышленных систем носило общемировой характер. Материалы конгресса США, а также ряд опубликованных в открытой печати данных показывают, что «Stuxnet» относится к новому классу программного обеспечения, разработанного на государственном уровне для неожиданных диверсионных кибернетических атак и обеспечения военных наступательных операций. Начиная с середины 2010г. было зафиксировано проникновение «Stuxnet» в сотни тысяч производственных компьютерных систем по всему миру. Уже в июле 2010 г. американская корпорация Microsoft была вынуждена официально подтвердить, что данный код активно и беспрепятственно заражает все компьютеры с

операционной системой Microsoft Windows в составе крупномасштабных государственных и коммерческих систем управления промышленным оборудованием, включая электростанции, сети электропередач, нефте- и газопроводы, перерабатывающие заводы, топливные склады и крупные военные объекты. При этом, среди прочих уязвимостей для атак были задействованы специальные секретные недокументированные закладки операционной системы, созданные ранее в целях обеспечения скрытного государственного контроля по стандартам Агентства национальной безопасности США [55]. Опасность, предоставляемая удалёнными атаками на компьютеризированные промышленные объекты и устойчивость против них различных операционных систем, может являться темой отдельного рассмотрения, однако подтверждение наличия «чёрных ходов», существующих внутри закрытых операционных систем важен уже сам по себе, ещё раз подтверждая, что одного лишь доверия производителю недостаточно для обеспечения своей безопасности. Подобные модули могут существовать не только в закрытой операционной системе, но и в любом закрытом программном продукте. Можно лишь надеяться, что данные «закладки» не используются в настоящее время по своему прямому назначению, например, для сбора конфиденциальной информации и секретных сведений с компьютеров, работающих под управлением закрытых операционных систем, таких как Windows. Также нет гарантий, что они не будут использованы в будущем для проведения массовых атак в целях дестабилизации обстановки в конкретной стране или регионе, например, в случае возникновения угрозы экономике США.

1.2.4. Риски, связанные с использованием свободного ПО

Использование свободных продуктов также несёт свои риски. Один из основных объективных рисков связан с сильной связью между количеством человек в сообществе, поддерживающем проект, и активностью его разработки. В некоторых случаях активное развитие проекта может поддерживаться небольшим количеством активных участников, но такие случаи достаточно редки. При неактивном сообществе развитие программы может замедлиться вплоть до бессрочной приостановки развития проекта. В случае свободного ПО приостановленные проекты не могут считаться прекратившими своё существование, поскольку в любой момент могут быть продолжены любым желающим при возникновении у него заинтересованности в дальнейшем развитии продукта. Однако для пользователей продукта, замедлившего или приостановившего своё развитие, это означает отсутствие оперативного исправления ошибок и расширения его функциональности, что в ряде случаев может доставлять существенные неудобства.

Маловероятно, что специфические программы, востребованные малым количеством специалистов в мире, будут иметь большое по объёму сообщество энтузиастов, поэтому для них данный вопрос становится особенно актуален. В то же время, именно эти программы могут быть весьма важны для отдельных организаций или государственных структур. Для решения данного противоречия в настоящее время широко используются три основных подхода: целевое финансовое стимулирование свободных проектов организациями, заинтересованными в их развитии, покупка услуг технической поддержки и непосредственное участие в проекте специалистов из заинтересованных организаций, которые могут иметь статус от рядовых участников сообщества до координаторов проекта. В случае координации свободного проекта компанией, у неё появляется дополнительная возможность направлять развитие проекта в необходимом ей направлении, поддерживать активность в совершенствовании критически важных функций программ, не теряя при этом преимуществ открытой модели разработки. Такой практикой активно пользуются многие крупные компании, заинтересованные в развитии того или иного продукта.

Существуют и мнимые риски использования СПО, выгодные для производителей собственного ПО и поддерживаемые за счёт недостаточной общественной осведомлённости, но, в реальности, не имеющие места. Первый связан с распространённым суждением об отсутствии технической поддержки у свободных продуктов, в противовес к развитой службе технической поддержки, имеющейся у многих коммерческих компаний-разработчиков. Данное мнение ошибочно. Существует большое количество компаний, осуществляющих техническую поддержку свободных продуктов. При необходимости, с одной из этих компаний может быть заключён договор об осуществлении коммерческой поддержки продукта. Поскольку в данном случае эта услуга не является навязываемой, договор с компанией, осуществляющей техническую поддержку может быть заключён лишь если в этом есть действительная необходимость. Кроме того, как правило, в данном случае техподдержка подразумевает не только консультации и помощь в работе, но и оперативное исправление ошибок, расширение функциональности под нужды пользователя.

Второй мнимый риск использования СПО связан с отказом его разработчиков от ответственности за какие-либо убытки, нанесённые по вине работы его программ. Однако, при рассмотрении текстов лицензионных соглашений несвободных коммерческих программ, становится очевидным, что подобный отказ от ответственности столь же характерен и для них. Таким образом, хотя данный риск и существует, он не является специфичным для СПО, а характерен для большинства программных продуктов.

Ещё один мнимый риск связан с наличием множества ошибок в свободном программном обеспечении. На самом деле, почти любой сложный программный продукт содержит большое

количество ошибок и нюансов, которые условно могут быть отнесены к ошибкам. Однако, информация об ошибках при разработке закрытого ПО как правило не афишируется, что может создать иллюзию их отсутствия. При открытой же модели разработки ПО, зачастую существует общедоступный перечень известных ошибок и недоработок, каждая из которых тщательно задокументирована для обеспечения коллективных работ над их исправлением. На первый взгляд, такой список может произвести удручающее впечатление на наблюдателя, однако, иллюзия большого количества ошибок на деле оказывается источником технического совершенства результирующего продукта.

1.3 Возможность создания свободной геолого-геофизической программной платформы

Если рассмотреть отдельно нишу геолого-геофизических программных продуктов, можно отметить, что доля свободных решений, относительно ряда других областей здесь крайне низка. Существующие свободные инструменты в большинстве случаев не являются системообразующими и не формируют вокруг себя активных свободных сообществ. Такое состояние дел связано со спецификой как решаемых задач и применяемых для этого инструментов, так и самого рассматриваемого рынка.

Специфика задач, решаемых геолого-геофизическим ПО, заключается в необходимости их комплексного, а иногда и системного решения, сами же задачи, как правило, весьма разнородны и находятся на стыке различных научных дисциплин. Для удовлетворения нужд прикладной геологии и геофизики необходим комплекс взаимосвязанных специализированных программ, позволяющий решать задачи специалистам из различных областей. Разработать такой комплекс можно только зная специфику самих задач, обладая опытом их решения либо возможностью привлечения непосредственно специалистов из тех областей, на которых ориентированы разрабатываемые инструменты. В отличие от программ общего назначения, разработать даже прототип комплекса геолого-геофизических программ, обладая лишь общими представлениями о его работе, практически невозможно.

Особенности геолого-геофизических задач предъявляет соответствующие требования к применяемым инструментам. Решаемые задачи многомерны, причём для выполнения отдельных операций необходимо переходить в специфические пространства. Рассматриваемые явления крайне разномасштабны: от долей секунд до масштабов геологического времени, от долей миллиметра до региональных масштабов. Возможные наборы исходных данных и сами изучаемые объекты крайне разнородны, из-за чего полная автоматизация решения большинства геолого-геофизических задач невозможна, и значительную роль приобретает наглядность и удобство средств визуализации и ручного управления, предоставляемых оператору. Несмотря

на разнородность решаемых задач, многие из них объединяет необходимость оперировать сложными комплексными объектами, такими как «скважина», «горизонт», «геофизический метод», что диктует необходимость изначальной поддержки подобных абстракций всеми компонентами геолого-геофизической системы.

Специфика рынка геолого-геофизических программных продуктов заключается в высоком уровне монополизации рынка крупными продавцами комплексных программных решений. Это делает высоким порог вхождения на данный рынок. Разработка системы взаимосвязанных программ является практически невыполнимой задачей для небольших исследовательских групп или индивидуальных исследователей. Авторы новых методик если и могут найти ресурсы для реализации своих алгоритмов, например, освоив программирование самостоятельно или пригласив в команду программиста, то, как правило, лишь для создания какого-то конкретного специализированного инструмента, необходимого в их рабочем процессе. Успешный выход на рынок с самостоятельным узкоспециализированным решением представляется проблематичным.

При разработке нового инструмента важной задачей становится его интеграция в сложившийся рабочий процесс. Как правило, инструмент выступает либо в роли изолированной среды, получающей данные на вход и выдающей некоторые другие данные на выход, либо интегрируется с уже существующими программными платформами. Поскольку свободная программная платформа в области прикладной геологии и геофизики отсутствует, авторы зачастую вынуждены оформлять свои инструменты в качестве приложений для закрытых платформ, реализуя их в виде скриптов, дополнений или связанных приложений. При этом возникает зависимость от закрытой платформы, созданное приложение оказывается бесполезным при отсутствии доступа к ней. Очевидно, данную проблему позволяет решить лишь создание свободной геолого-геофизической программной платформы, то есть системы, функционал которой пользователи могли бы расширять либо непосредственно, либо разрабатывая для неё необходимые дополнения.

Существует много свободных средств, которые могли бы быть использованы для создания такой системы. Имеется ряд языков программирования, имеющих полностью свободные инструменты разработки, свободные файловые системы и системы управления базами данных, большое количество разнообразных свободных библиотек, предлагающих готовые средства для выполнения тех или иных операций. Нельзя не упомянуть про широко используемый в различных научных проектах свободный язык анализа и обработки данных R, вокруг которого уже сформировалось активное свободное сообщество. Многие из указанных средств легко могут быть интегрированы в единую систему, что подтверждается их активным комплексным использованием в свободных геоинформационных системах.

Очевидно, для решения задач прикладной геологии и геофизики указанные средства если и необходимы, то явно недостаточны. Как отмечалось выше, спецификой геолого-геофизических систем является необходимость введения набора абстракций, обладающих специфическими свойствами и устойчивыми взаимоотношениями между собой. Без их введения даже простейшие рутинные операции, наподобие пересчёта скважинных данных из относительных глубин в абсолютные с учётом кривизны ствола скважины, окажутся крайне трудоёмкими для оператора. При решении научных задач исследователь может самостоятельно вводить все необходимые ему абстракции и ограничения, используя любые удобные для него программные средства, и в дальнейшем самостоятельно следить за их соблюдением. В то же время, для прикладных задач совершенно необходимо, чтобы необходимые абстракции и ограничения уже были заданы архитектурой программы.

Таким образом, для создания универсальной свободной системы, пригодной для использования не только авторами, но и рядовыми пользователями, одного лишь набора существующих свободных средств недостаточно, необходим как минимум ещё слой геолого-геофизических абстракций. Поскольку имеющиеся свободные средства такой возможности не предоставляют, можно говорить о необходимости создания специальной системы. Данная система должна изначально поддерживать все основные геолого-геофизические абстракции, их ограничения и взаимоотношения между ними, уметь хранить, визуализировать и обрабатывать данные в соответствующих им пространствах и масштабах. Кроме того, необходима также поддержка распространённых форматов геолого-геофизических данных, таких как Ias, SEG-Y, GRDECL и др.

Невозможность охватить готовым набором программ весь спектр задач, решаемых прикладной геологией и геофизикой, диктует необходимость разработки программной платформы, то есть системы, в архитектуру которой изначально заложена возможность взаимодействия с внешними программами, расширяющими имеющуюся функциональность. При этом сама платформа должна обладать некоторой самодостаточностью, позволяющей получить положительный эффект от её включения в рабочий процесс даже при отсутствии каких-либо дополнений. Вынесение специализированных функций в дополнительные модули позволит избежать загромождения основной программы маловостребованными функциями, необходимыми лишь при решении специализированными задач. Дополнительными преимуществами разработки единой платформы является возможность развития единого свободного сообщества вместо нескольких разобщённых. Для большего охвата заинтересованных лиц, вероятно, имеет смысл предусмотреть возможность подключения как свободных, так и собственных модулей.

Важным фактором, необходимым для удобства работы оператора сложной системы, является унификация применяемых в ней средств. Поскольку разные пользователи могут иметь разные представления об удобстве работы, неконтролируемое развитие ими инструментов на свой вкус может привести к снижению удобства всей системы в целом. Для успешной коллективной разработки единой системы необходим постоянный контроль унификации средств и общей эргономики системы, скоординированная разработка плана по их совершенствованию и выработка соответствующих спецификаций. Контроль должен осуществляться коллективом наиболее активных разработчиков, куда могут входить также представители курирующих организаций.

Поскольку успех свободных систем во многом зависит от активности свободного сообщества, важно обеспечить условия, при которых продукт может быть для него интересен. Здесь имеет значение не только архитектура и специфические функции данного программного продукта, но и правильный выбор свободной лицензии. Поскольку ниша геолого-геофизических программных продуктов относительно невелика, а количество предметных специалистов, дополнительно владеющих программированием – ещё меньше, от правильного выбора лицензии может зависеть успех всего проекта. Существует три основных типа свободных лицензий: строгий (GPL и GPL-подобные), мягкий (BSD и BSD-подобные), а также промежуточный (LGPL и LGPL-подобные).

GPL и GPL-подобные – требуют сохранения лицензии производных продуктов, гарантируя свободу проекта как сейчас, так и в будущем: программа может свободно модифицироваться, но распространяться модифицированные версии могут только под исходной лицензией. Такой подход выгоден для разработчиков, хотя и невыгоден для поставщиков конкурирующих несвободных решений. Эффективен для привлечения энтузиастов, быстрого создания сообщества.

LGPL и LGPL-подобные – близки к GPL-подобным, но допускают линковку с любой программой, не обязательно свободной. Такой подход выгоден для разработчиков свободных библиотек, допуская использование этих библиотек любыми проектами, и, в конечном итоге, повышая их популярность.

BSD и BSD-подобные – допускают использование результата внутри несвободных систем и их дальнейшее развитие под несвободными лицензиями. Концептуально они близки к научным публикациям, поскольку не накладывают существенных ограничений на дальнейшее использование результатов. Данный тип лицензий выгоден поставщикам несвободных решений, позволяя брать готовый код, ничего не отдавая взамен, что не всегда выгодно свободным разработчикам. В то же время, подход может быть вполне жизнеспособен для больших активных проектов, поскольку поставщикам несвободных решений зачастую

оказывается проще добавлять часть своих усовершенствований в основную ветку разработки, нежели постоянно обновлять свою собственную.

В общем случае, наиболее эффективным решением можно считать применение GPL-подобных лицензий для конечного продукта и LGPL-подобных – для библиотек. Такой подход позволяет привлечь как свободных разработчиков, гарантируя им свободу развиваемого продукта, так и поставщиков закрытых продуктов – привлекая их к коллективному совершенствованию свободных библиотек.

Эффективным средством формирования сообщества и привлечения новых разработчиков может являться развитие специализированного форума, позволяющего специалисту пройти путь от интересующегося до опытного пользователя, и, наконец, пользователя-разработчика. Очевидно, лишь небольшая часть пользователей пройдёт данный путь до конца, внося непосредственный вклад в разработку продукта. Но даже неопытные пользователи могут быть полезны сообществу, помогая тестировать новую функциональность, создавая отчёты об ошибках, участвуя в коллективных проектах по переводу интерфейса и документации. Опытные пользователи, даже если они не владеют программированием, могут внести свой вклад в виде идей, методик, спецификаций, методических материалов. Очевидно, чтобы заинтересовать рядового пользователя в совершенствовании продукта, данный продукт должен быть интересен ему и решать какие-то его прикладные задачи. Именно поэтому важно наличие некоторой очевидной для пользователя функциональности программы ещё в момент её анонса, важна её самодостаточная полезность даже при отсутствии каких-либо дополнительных модулей.

Таким образом, для эффективного развития независимых свободных продуктов в области прикладной геологии и геофизики наиболее эффективным представляется создание и развитие свободной геолого-геофизической программной платформы. «Свободной» – то есть опубликованной и развиваемой под свободной лицензией, например, GPL – для конечного продукта, LGPL – для библиотек. «Геолого-геофизической» – то есть изначально поддерживающей все основные геолого-геофизические абстракции и взаимоотношения между ними, умеющей хранить, визуализировать и обрабатывать данные в соответствующих им пространствах и масштабах, поддерживающей распространённые форматы геолого-геофизических данных. «Программной платформы» – то есть системы, в архитектуру которой изначально заложена возможность взаимодействия с внешними программами, расширяющими имеющуюся функциональность.

Концепция свободной геолого-геофизической программной платформы была впервые сформулирована автором в 2012 году [30]. В результате выполненного анализа предметной области было показано [24, 28], что реализация свободной геолого-геофизической программной платформы является одним из эффективных средств укрепления экономической безопасности страны, развития образования в области геологии и геофизики, усиления научного потенциала и престижа отечественной науки. В частности, данная концепция может быть эффективно применена в отечественной нефтегазовой отрасли, находящейся в настоящее время в значительной зависимости от разработчиков закрытых программных продуктов, зачастую зарубежных. Одним из результатов популяризации концепции свободной геолого-геофизической программной платформы стало привлечение ведущего отечественного разработчика геолого-геофизического программного обеспечения для нефтегазовой отрасли, ОАО «Центральная Геофизическая Экспедиция», и подготовка проекта свободной геолого-геофизической программной платформы, в разработке которого автор участвовал как независимый эксперт. В июне 2012г. проект был представлен на 3-й международной конференции по актуальным вопросам инновационного развития нефтегазовой отрасли ЭНЕРКОН-2012 [52]. В итоговой резолюции по результатам конференции, среди рекомендаций по вопросам развития нефтегазовой отрасли, отдельным пунктом отмечается:

Ходатайствовать о реализации проекта «Разработка открытой геолого-геофизической программной платформы на принципах Свободного Программного Обеспечения (СПО)» и включении данного проекта в Технологические платформы, входящие в перечень Министерства экономического развития России, а именно: «Технологии добычи и использования углеводородов» и «Национальная программная платформа» [88]

Столь высокое внимание к проекту, реализующему предложенную автором концепцию, подтверждает её актуальность для современной отечественной науки и производства.

В случае геоинформационных систем уже сейчас большинство прикладных задач, востребованных в нефтегазовой отрасли [67] и, в частности, при подготовке и анализе пространственных данных ПХГ может быть успешно решено с использованием СПО [33]. Наиболее эффективной платформой для работы с двухмерными данными в настоящее время является геоинформационная система QGIS, с трёх- и четырёхмерными – GRASS GIS. Для анализа, обработки и визуализации данных может быть эффективно использована система R, для визуализации многомерных данных – ParaView и ParaViewGeo. Хранение больших объёмов пространственных данных может быть организовано с использованием PostgreSQL и PostGIS. Благодаря открытости их архитектуры данные системы удобно стыкуются между собой, благодаря чему их можно рассматривать как единый комплекс. Данный комплекс или

отдельные его элементы могут эффективно применяться и для решения отдельных задач геологического, комплексного геолого-геофизического, и даже сложного пространственно-временного моделирования геологических объектов и протекающих в них процессов, в том числе и объектов ПХГ. Например, известна возможность реализации геологических моделей в среде GRASS GIS [83], причём достаточно старой, по современным меркам, версии, со времени выхода которой функциональность работы с многомерными данными была существенно доработана. В то же время, ни GRASS GIS, ни более сложные системы, построенные на основе свободных геоинформационных систем, в настоящее время нельзя в полной мере считать пакетами геологического моделирования. Безусловно, при существенной доработке свободная геолого-геофизическая программная платформа может быть развёрнута на базе этих программных средств, однако такая доработка в любом случае потребует существенных трудозатрат, поэтому в среднесрочной перспективе её реализация представляется маловероятной.

Таким образом, хотя отдельные элементы свободной геолого-геофизической программной платформы уже могут быть реализованы на основе уже имеющихся свободных инструментов, значительно более реалистичным является сценарий частичного или полного открытия наработок одного из ведущих пакетов геологического моделирования, ставящего его в принципиально более выигрышное по отношению к конкурентам положение. В то же время, поскольку данное событие зависит от ряда неизвестных факторов, и не может быть достоверно спрогнозировано, в ближайшие годы стоит ориентироваться прежде всего на использование одного из уже присутствующих на рынке комплексов геологического моделирования, поскольку из-за всё возрастающей комплексности данных программных продуктов, появление новых игроков на данном рынке из года в год становится всё менее вероятным.

В связи с этим приоритетной задачей представляется рассмотрение подходов к моделированию и конкретных алгоритмов, реализованных в уже существующих продуктах геологического моделирования, оценка их адекватности решаемой задаче и разработке оптимальной методики на основе их инструментария. В случае геологического моделирования ПХГ это означает необходимость систематизации специфических аспектов ПХГ, как моделируемых объектов, анализ корректности работы предлагаемых процедур геологического моделирования в условиях, характерных для ПХГ, а также оценку общей адекватности предлагаемой методологии моделирования для построения достоверных геологических моделей. В то же время, для решения задач, требующих специфических средств, не реализованных в существующих коммерческих продуктах, рационально вести разработку, базирующуюся на использовании элементов СПО, тем более, что использование коммерческих

продуктов геологического моделирования не накладывает каких-либо ограничений на параллельное использование свободных средств и постепенную миграцию на них. Например, для задач, которые уже сейчас могут быть эффективно решены с использованием свободных геоинформационных систем, средств анализа и визуализации данных представляется рациональным полностью выстраивать рабочий процесс, базирующийся на их использовании.

ГЛАВА 2. СПЕЦИФИКА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА, КАК МОДЕЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Существующие в настоящее время подземные хранилища газа достаточно разнородны, их можно подразделить на отдельные классы, по объекту хранения, количеству объектов, пластовой энергии (режиму эксплуатации) и т.д. [4]. Поскольку отдельные классы имеют присущую только им специфику изучения и моделирования, для более полного понимания предметной области, необходимо хотя бы в общих чертах привести эту классификацию.

По объекту хранения существующие в настоящее время подземные хранилища газа различаются на следующие классы:

- ПХГ в водоносных пластах
- ПХГ в истощённых газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождениях
- ПХГ в отложениях каменной соли (в солевых кавернах)

Наиболее распространёнными в России являются ПХГ в водоносных пластах и в истощённых месторождениях, в значительной степени подобные нефтегазовым месторождениям (Рисунок 38). Важно отметить, что именно для этих же двух типов применяются методология геологического и гидродинамического моделирования, разработанная для нефтегазовых месторождений. Объекты ПХГ в отложениях каменной соли распространены значительно меньше. Поскольку учёт газа в них не требует выполнения фильтрационного моделирования и может выполняться простыми аналитическими методами, традиционное геологическое моделирование таких объектов не выполняется. Существуют и другие типы ПХГ, созданные в единичных экземплярах или ещё не реализованные [48], в настоящее время не применяемые в отечественной практике подземного хранения газа.

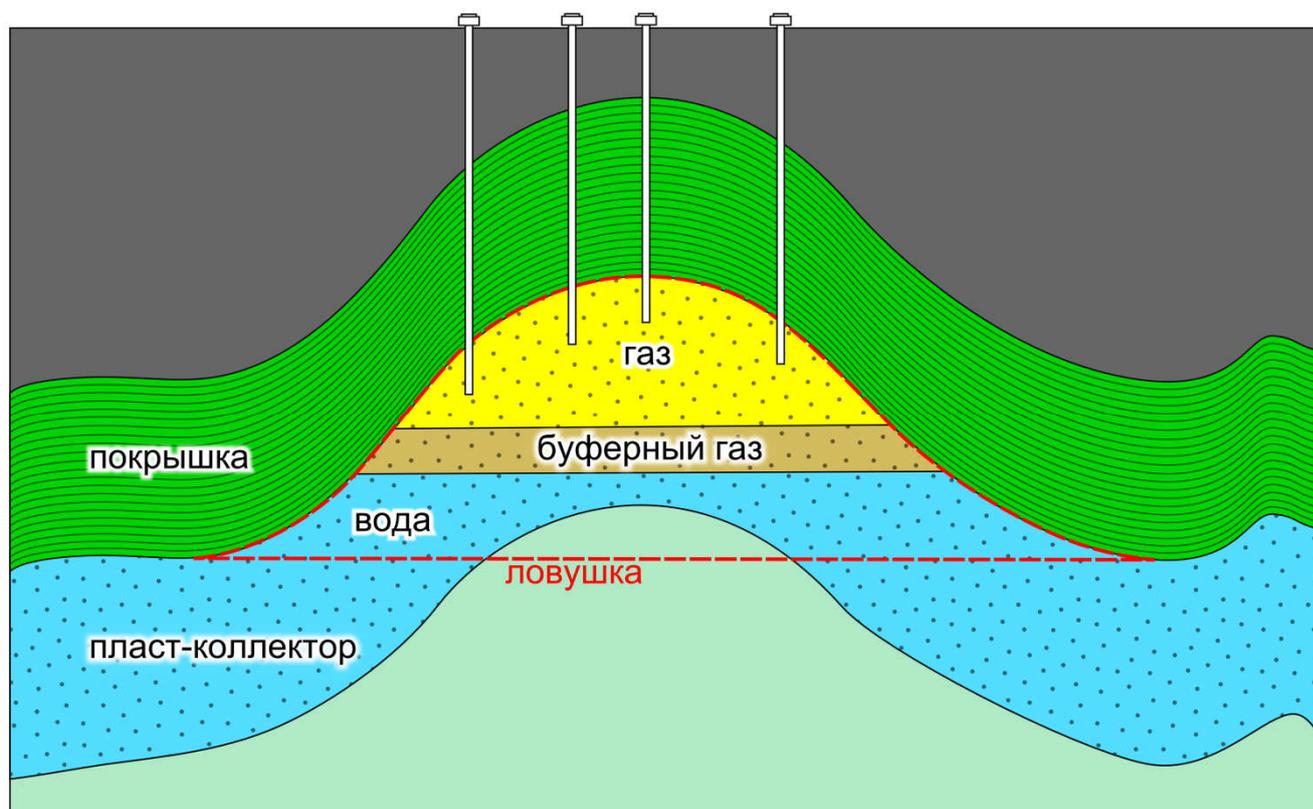


Рисунок 38 – концептуальная модель строения объекта ПХГ в водоносном пласте

С точки зрения моделирования ПХГ в истощённых месторождениях близки к соответствующим месторождениям. Для них, как правило, имеются уже созданные геологическая и гидродинамическая модели, применявшиеся при их разработке, и соответствующие массивы геолого-геофизических и промысловых данных. При эксплуатации ПХГ, созданных в истощённых месторождениях, в значительной степени используется фонд скважин, пробуренный и эксплуатировавшийся при разработке месторождения. Такие скважины хотя и сгруппированы в первую очередь в сводовой части структуры, но распределены достаточно равномерно, по ним выполнялся и имеется полный комплекс геофизических исследований ГИС-бурение.

Объекты ПХГ в водоносных пластах создаются в пласте-коллекторе, не имеющем начальной газо- и нефтенасыщенности. Данные поисково-разведочного бурения, имеющиеся по таким объектам, как правило, содержат менее полный комплекс ГИС-бурение, чем по месторождениям, часто достаточно разнородный или неполный. Эксплуатационное бурение ведётся, как правило, на весьма компактных участках сводовой части структуры, вскрывая при этом лишь верхнюю часть пласта-коллектора. Из промысловых данных по объекту могут присутствовать лишь результаты гидропрослушивания (отбора жидкости по одной из скважин с регистрацией изменения уровня и давления по остальным, как правило, соседним скважинам) и опытной закачки и отбора газа.

По пластовой энергии ПХГ подразделяются на следующие классы:

- ПХГ с газовым режимом, имеющие постоянный газонасыщенный поровый объём
- ПХГ с упруго-водонапорным режимом, имеющие переменный газонасыщенный поровый объём

С точки зрения геологического моделирования и уточнения геологического строения, данные типы ПХГ различаются в первую очередь подходами к ведению мониторинга их эксплуатации, информативностью данных ГИС-контроль и, соответственно, возможностями уточнения модели по геофизическим данным.

По типу пластов коллекторов объекты ПХГ можно подразделить на следующие классы:

- ПХГ в пластах-коллекторах трещинного и порово-трещинного типа. Как правило, это карбонатные отложения различного генезиса, реже – плотные терригенных пород, породы вулканогенно-осадочного генезиса и др.

- ПХГ в пластах-коллекторах преимущественно порового типа. Как правило, это терригенные отложения различного генезиса

При моделировании пластов-коллекторов трещинного и порово-трещинного типа скважинной геолого-геофизической информации как правило недостаточно, чтобы достоверно охарактеризовать распределение фильтрационно-емкостных свойств объекта. Наиболее достоверной информацией в данном случае являются результаты гидродинамических испытаний, также могут быть привлечены структурные факторы (анализ истории осадконакопления и формирования структуры, прогноз вероятного распределения нагрузок и направления кливажа и разломных зон), какую-то информацию может дать специальный анализ сейморазведочных работ, если это позволяет детальность их результатов. В любом случае, однозначный прогноз свойств в данном случае как правило невозможен, в связи с чем любая информация получаемая при эксплуатации объекта может привести к существенному пересмотру представлений о его геологическом строении.

При моделировании пластов-коллекторов преимущественно порового типа основным источником информации, характеризующей свойства пласта-коллектора, являются скважинные геолого-геофизические данные (результаты ГИС-бурения, результаты исследования керна, иногда - шлама). Результаты гидродинамических исследований (в случае ПХГ в истощённом месторождении – в первую очередь, история разработки месторождения, в случае ПХГ в водоносном пласте - гидропрослушивание, опытная закачка), структурный анализ и анализ истории осадконакопления также могут являться ценным источником информации, однако роль их, как правило, вспомогательная.

Говоря об отличиях геолого-технологического моделирования ПХГ по сравнению с моделированием нефтегазовых месторождений, в первую очередь обычно подразумевают специфику фильтрационного моделирования, связанную с быстротечностью и переменной направленностью фильтрационных процессов. Вместе с тем, геологическому моделированию ПХГ также присущ ряд специфичных черт. Практика построения геологических моделей ПХГ показала, что задача геологического моделирования ПХГ, хотя и крайне родственная задаче геологического моделирования нефтегазового месторождения, всё же обладает некоторыми отличительными чертами, требующими применения специализированных методик и подходов [35]. Использование при этом программных продуктов и подходов, первоначально разработанных для месторождений, в случае моделирования ПХГ зачастую ставит их в условия, для работы в которых они не были предназначены. При использовании некоторых инструментов проявляются их принципиальные ограничения, в обычных случаях скрытые или менее заметные. Неучёт подобной специфики на практике может приводить к построению некорректных моделей на основе даже полностью корректных исходных данных [23].

Специализированная литература по геологическому моделированию ПХГ отсутствует, в то время как применяемые методические и регламентные документы [1, 2, 3] и существующая учебная литература [15, 43, 42], написанные для месторождений, не рассматривают вопросы моделирования ПХГ. Всё это требует рассмотрения геологического моделирования ПХГ как самостоятельной задачи, хотя решение проблем, ставящихся при моделировании ПХГ, может впоследствии использоваться и для повышения достоверности моделирования месторождений [31].

Чтобы иметь возможность систематизировать особенности применяемых для моделирования ПХГ методов, предварительно необходимо систематизировать сами особенности самих подземных хранилищ, как объектов моделирования. Основными из этих особенностей являются следующие:

- Отсутствие (для ПХГ в водоносном пласте) или незначительность (для ПХГ в истощённом месторождении) начальных запасов газа. Текущие объёмы газа и конфигурация залежи могут изменяться в широких пределах в зависимости от объёмов закачанного и отобранного газа и принятых режимов эксплуатации хранилища. Геологическая модель позволяет оценить лишь общий поровый объём структуры в пределах некоторого контура. Оценка конфигурации газовой залежи и текущих объёмов газа по данным ГИС-контроль на основе геологической модели хотя и возможна, но, как правило, недостаточно достоверна, поскольку не учитывает физику процесса закачки и отбора газа в объект эксплуатации.

Относительно достоверно текущее распределение газовой залежи может быть получено только по данным гидродинамического моделирования.

- Невозможность использования в качестве исходных данных для прогноза фильтрационно-емкостных свойств результатов поинтервального опробования (в случае ПХГ в водоносном пласте). Из-за отсутствия начального углеводородного насыщения пласта-коллектора единственными источниками данных о фильтрационно-емкостных свойствах окружающих пород при создании хранилища являются данные каротажа и результаты их интерпретации [57, 60], результаты исследований керна [45], и отчасти, межскважинного гидропрослушивания. Если пористость может быть относительно достоверно изучена по керновым данным, и после привязки к результатам каротажа распространена на весь разрез, то достоверность определения проницаемости по керну существенно ниже. Поскольку возможность привязки к результатам поинтервального опробования отсутствует, а результаты межскважинного гидропрослушивания или опытной закачки не всегда могут быть однозначно проинтерпретированы, неопределённость прогноза проницаемости по скважинам существенно выше. В то же время, возможность достоверного воспроизведения фильтрационных процессов в гидродинамической модели существенным образом зависит от достоверности первоначального задания распределения проницаемости геологической модели.

- Первоначальная геолого-геофизическая изученность объектов (в случае ПХГ в водоносном пласте). Поскольку в типовом случае объекты ПХГ в водоносном пласте – изначально «пустые» структуры, выведенные из консервации, их первоначальная изученность существенно ниже, чем у месторождений. Фактически, на первоначальных этапах проектирования ПХГ, структуры, как правило, недоизучены. Архивные материалы не всегда доступны в полном объёме, 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 в кровельной части структуры. Поскольку ПХГ в водоносном пласте зачастую создаются в терригенных коллекторах, обладающих высокой внутренней изменчивостью распределения свойств, неоднородность распределения скважинных данных может приводить к ситуации, когда плотность скважин в некоторых областях оказывается явно недостаточной для однозначного воспроизведения имеющейся изменчивости свойств, в то время как для других – достаточной и даже избыточной (Рисунок 39).

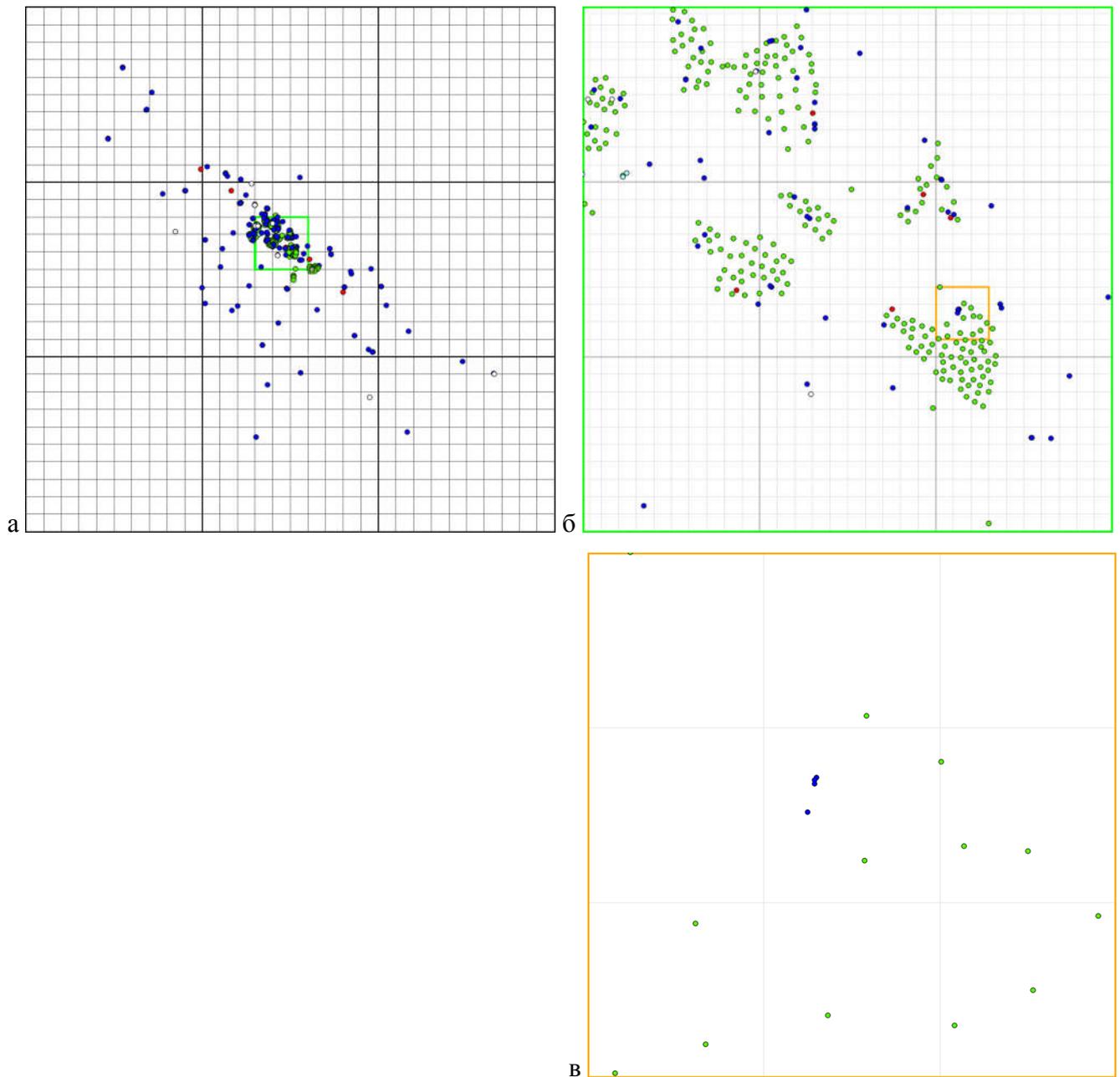


Рисунок 39 – неоднородность распределения скважин на ПХГ в водоносном пласте: а – на уровне объекта, б – на уровне части объекта, в – локальная

Из-за неоднородности распределения скважин и, соответственно, скважинных данных количество информации, характеризующей геологическое строение объекта, оказывается крайне неоднородным (Рисунок 40). Кроме того, столь высокая неоднородность размещения скважинных данных сказывается на работе некоторых алгоритмов анализа данных, фациального и параметрического моделирования, традиционно используемых при геологическом моделировании. Данные алгоритмы, корректные при относительной однородности данных, в их случае их высокой неоднородности могут приводить к получению некорректных результатов.

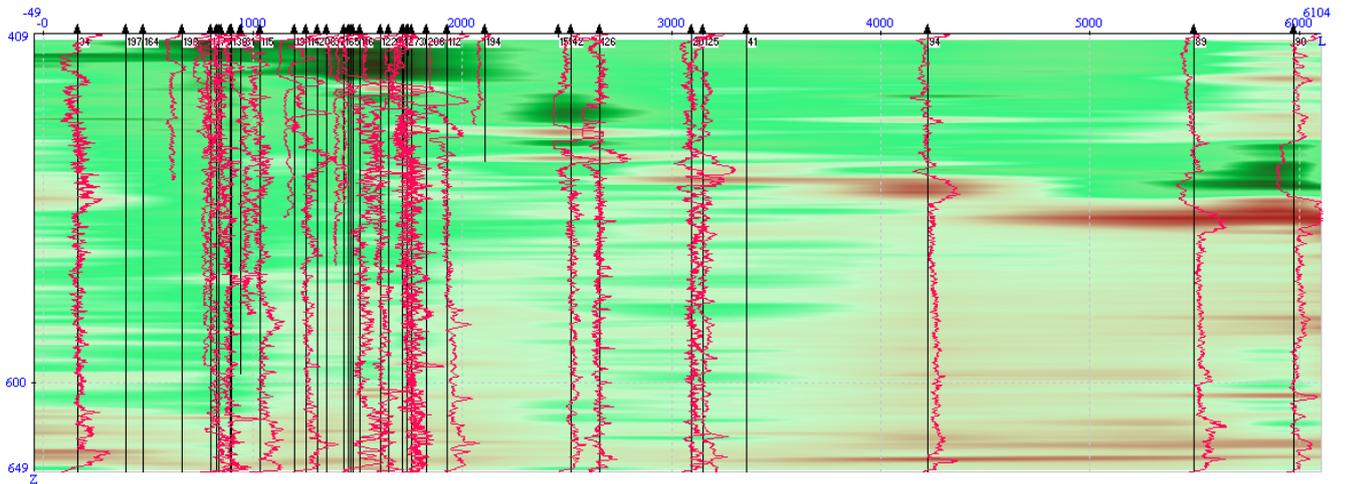


Рисунок 40 – Неоднородность распределения скважинной информации при моделировании распределения свойств терригенного пласта-коллектора ПХГ в водоносном пласте

- Неоднородность распределения исходных скважинных данных по глубине. По технологическим причинам скважины, вскрывающие пласт-коллектор во многих случаях не добуриваются до подошвы пласта, не позволяя получить его структурные отбивки 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 неоднородна по представительности исходных данных: верхняя часть оказывается значительно более полно изучена и, соответственно, может быть смоделирована существенно более достоверно, чем нижняя (Рисунок 41).

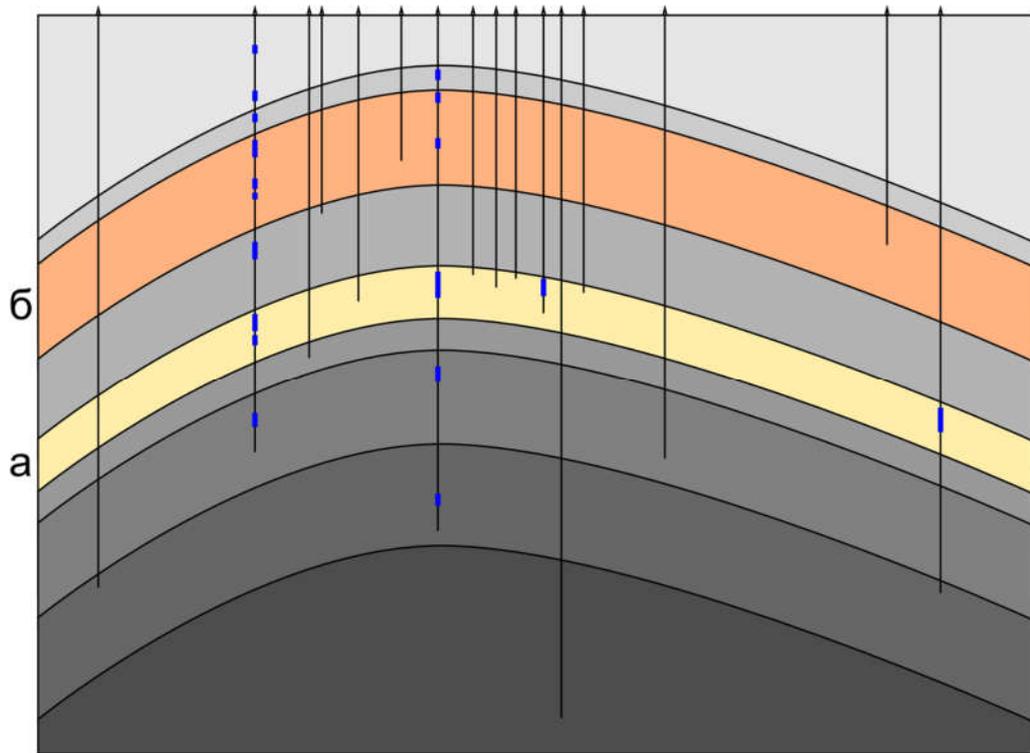


Рисунок 41 – Схема возникновения неоднородности геолого-геофизической изученности идеализированного объекта ПХГ со 100%-ной охарактеризованностью скважин данными каротажа: а – пласт коллектор, б – контрольный горизонт. Синие участки – интервалы отбора керна

В случаях, когда исследования ГИС-бурение проводятся поинтервально без перекрытия интервалов, может накапливаться систематическая неоднородность охарактеризованности разреза данными, и, соответственно, возможной достоверности прогноза. В случае, если распределение данных интервалов имеет неслучайный характер, например, по технологическим причинам, приходится на глинистые перемычки между пластами-коллекторами (Рисунок 42), подобная неоднородность представительности исходных данных может рассматриваться как цензурированность выборки исходных данных относительно генеральной совокупности.

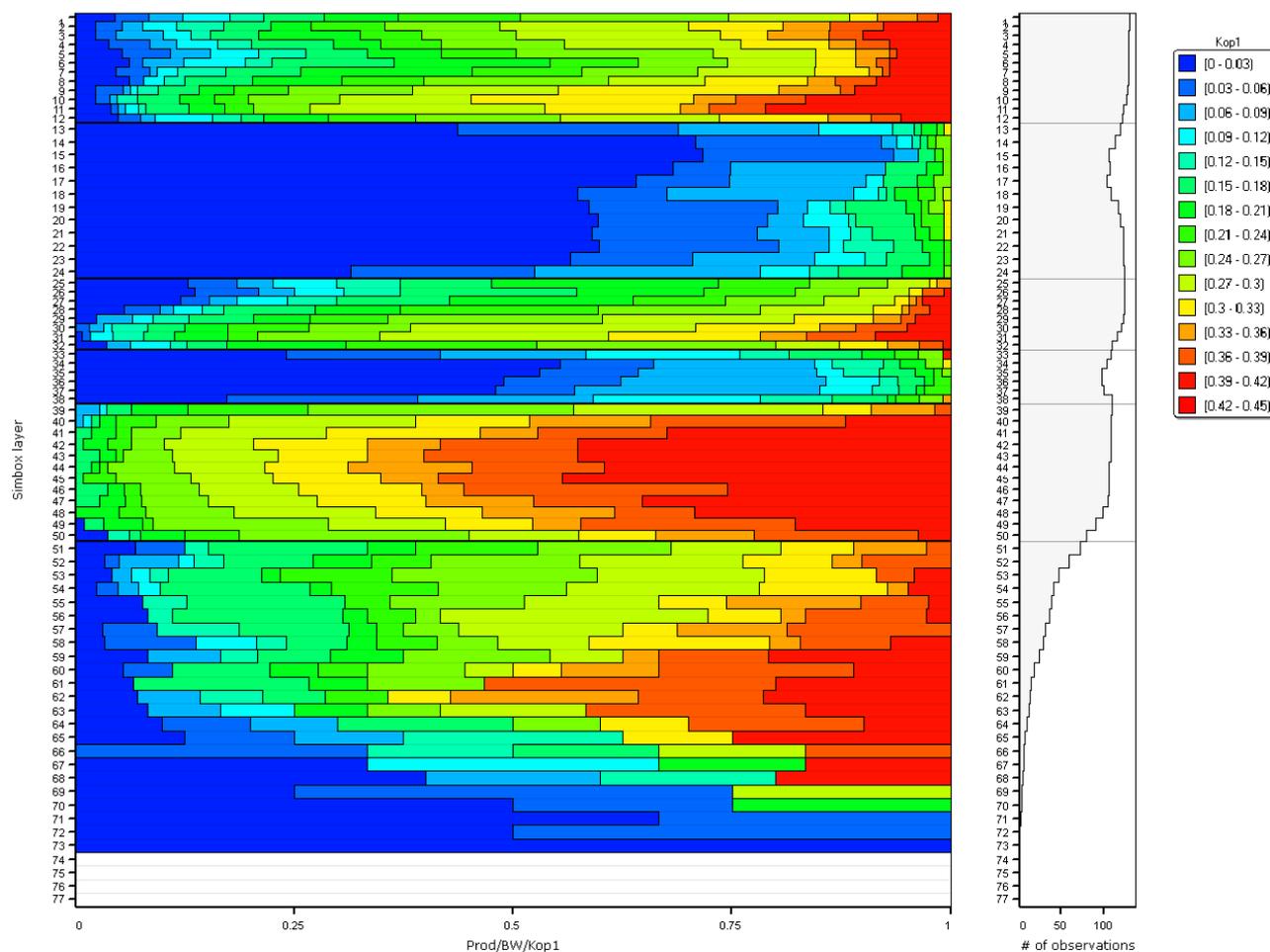


Рисунок 42 – степень охарактеризованности скважин данными каротажа реального объекта ПХГ. Левая часть диаграммы – распределение значений пористости для каждого слоя трёхмерной сетки, правая часть – количество наблюдений, по которому это распределение было получено. Слабопроницаемые интервалы за счёт поинтервального проведения геофизических замеров в скважинах охарактеризованы существенно меньшим количеством наблюдений

- Особенности изучения объекта геофизическими методами. В случае ПХГ, создаваемых в терригенных отложениях, мощности проницаемых прослоев, используемых в качестве пластов-коллекторов, зачастую настолько малы, что не могут быть достоверно охарактеризованы современными методами площадных геофизических исследований. В данной ситуации можно говорить о том, что исследователя больше интересуют не стратиграфические, а литологические границы. При такой постановке задачи разрешающая способность современной сейсморазведки оказывается явно недостаточна, поскольку получаемые данные не позволяют однозначно охарактеризовать не только внутреннее строение пласта-коллектора, но и даже достоверно провести его границу (Рисунок 43).

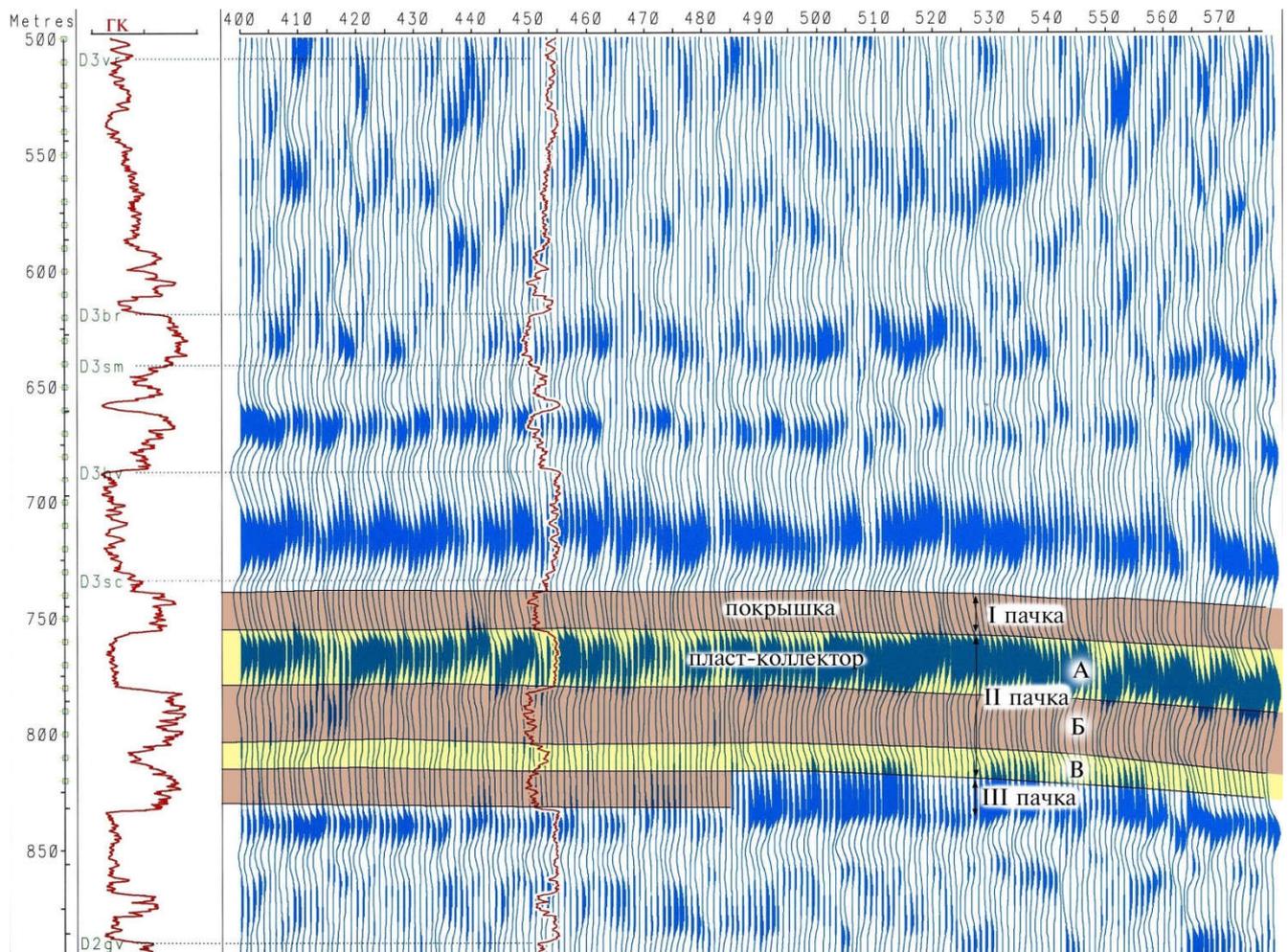


Рисунок 43 – Сопоставление детальности скважинных данных и результатов сейсморазведки МОГТ 2D при выделении пачек пласта-коллектора ПХГ в водоносном пласте (по материалам ОАО «Костромагеофизика», 2003г.)

Наиболее информативны площадные геофизические исследования могут быть в задачах прослеживания контрастных по свойствам границ, контролирующих залегания пластов-коллекторов и их покрышек. Корректная постановка задачи в ряде случаев позволяет решать задачи оценки пригодности структуры для создания хранилища (Рисунок 44), однако основным источником информации о строении и свойствах пластов-коллекторов, покрышек и основных стратиграфических границ моделируемого блока недр во всех случаях остаются скважинные данные.

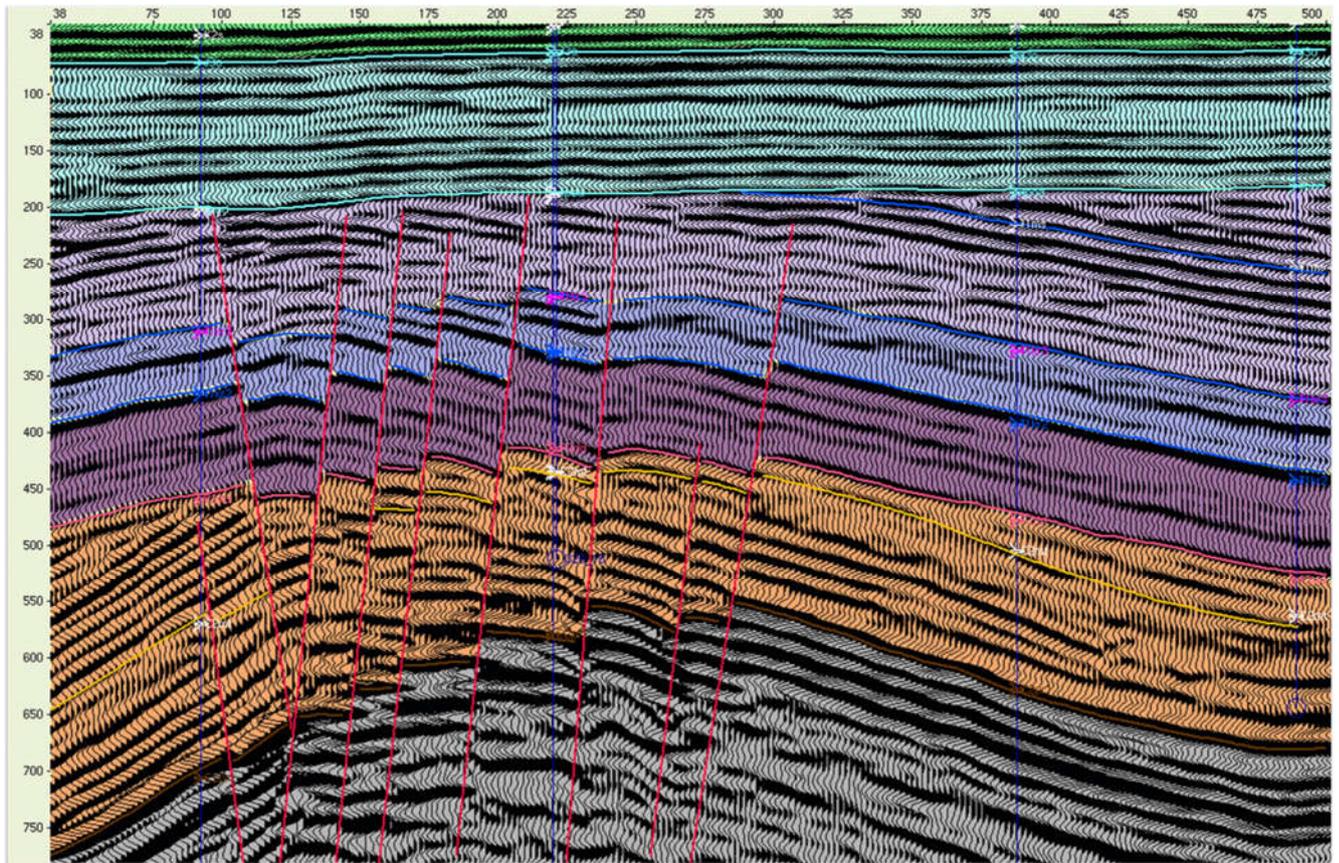


Рисунок 44 – уточнение строения структуры, первоначально считавшейся перспективной для создания ПХГ в водоносном пласте, с выявлением множественных тектонических нарушений, осложняющих её строение, в результате проведения исследований МОГТ-3D (по материалам РУП «ПО «Белорусьнефть», 2004г.)

- Особенности доизучения объекта в процессе эксплуатации. По технологическим причинам новые скважины бурятся в хорошо изученных областях, а в слабоизученных скважины бурятся гораздо реже. Из-за рассмотренной выше 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 бывает необходимо проводить специальные мероприятия по доизучению.

- Вопросы герметичности ПХГ. Если месторождения являются объектами, формирующимися в масштабах геологического времени, герметичность которых не вызывает сомнений, то герметичность ПХГ в водоносном пласте может быть поставлена под сомнение: её надо сначала доказать, а затем всё равно контролировать. В связи с этим зачастую кровля пласта-коллектора не может рассматриваться как поверхность, ограничивающая моделируемый блок недр. 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, пронизаемых тектоническими разломами и т.п. В связи с этим, зачастую модель ПХГ включает не только модель пласта-коллектора, но и достаточно детальную модель пласта-покрышки или его части. В случае наличия перетоков газа как правило требуется моделирование не только пласта-коллектора, но и гидродинамически связанных с ним толщ (Рисунок 45). Кроме того, традиционно, объекты ПХГ моделируются до дневной поверхности или приповерхностных отложений (Рисунок 46). Подобная модель надпродуктивной толщи не используется для гидродинамического моделирования, но служит основой для проведения работ по оценке герметичности.

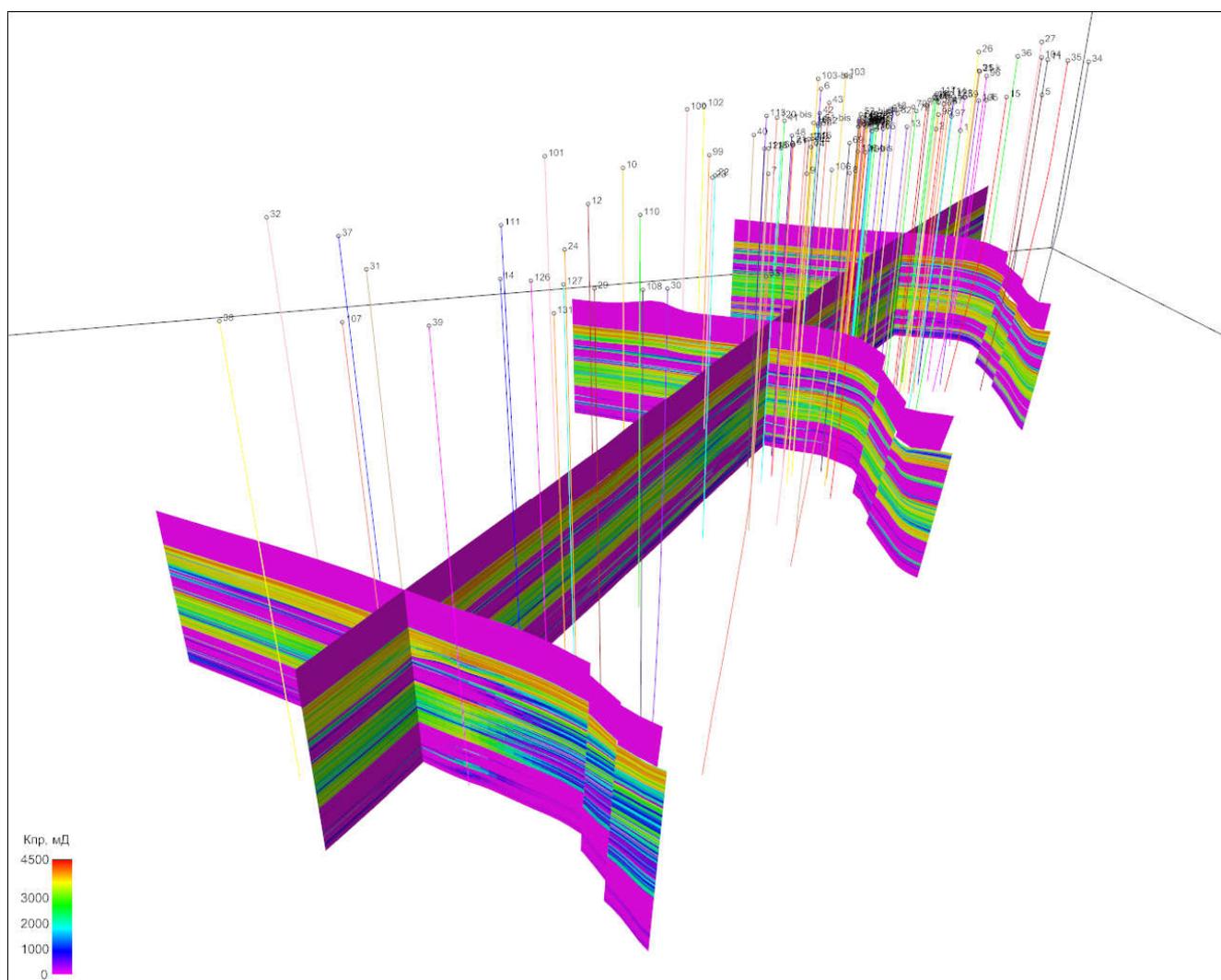


Рисунок 45 – пример геологической модели многопластового объекта ПХГ

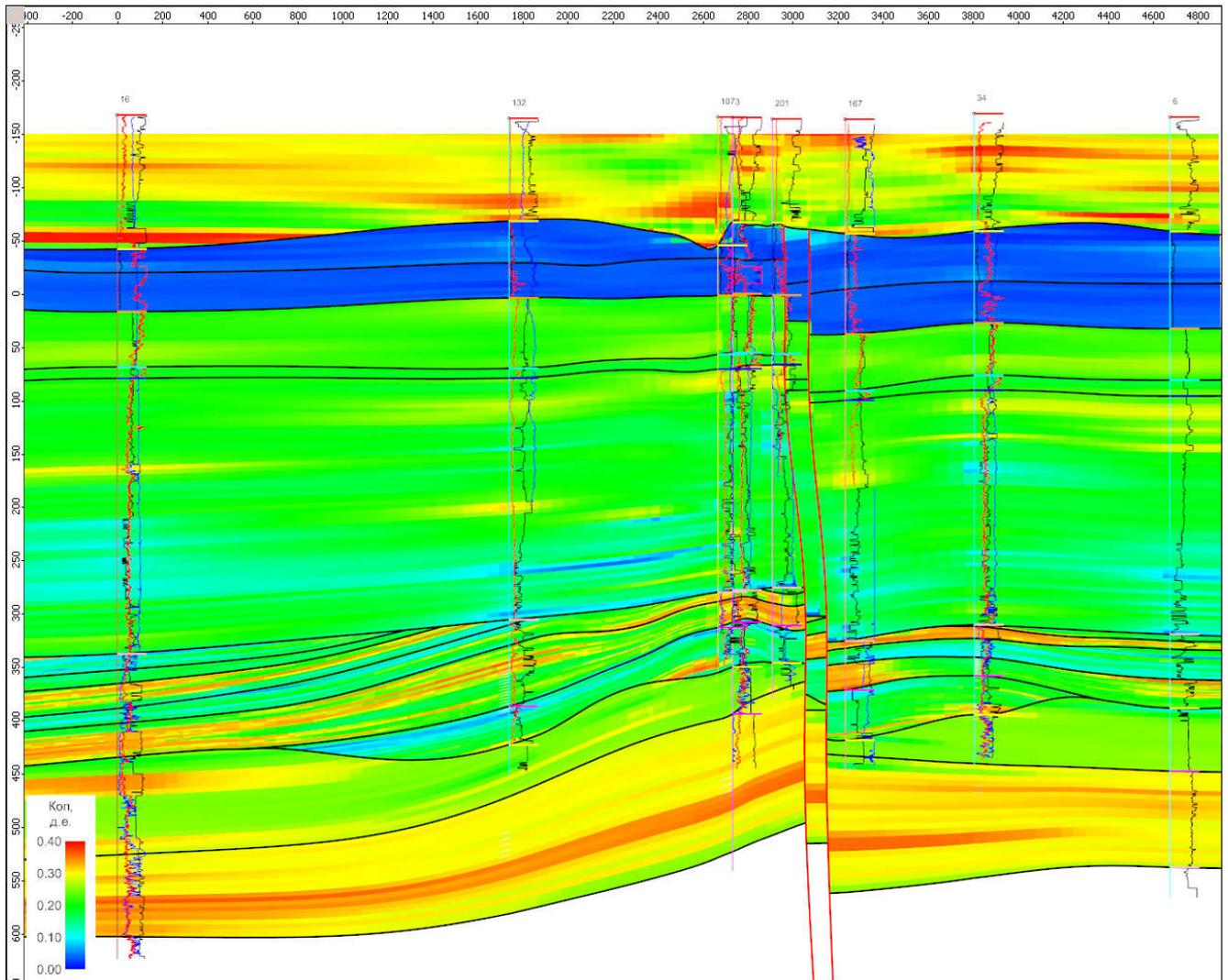


Рисунок 46 – пример геологической модели объекта ПХГ, построенной до дневной поверхности. Вертикальный разрез

- Разнонаправленность фильтрационных процессов в пласте. Если из месторождения происходит только отбор углеводородов, то есть процесс фильтрации является в целом однонаправленным, то в ПХГ закачка и отбор газа чередуются, иногда с существенными отклонениями от идеализированного циклического режима. Поскольку объём и конфигурация залежи во многом зависит от принятых режимов и объёмов закачанного/отобранного газа, необходимо моделировать пласт в пределах объекта в полном объёме в пределах всей структуры до замка, а в отдельных случаях (небольшие малоамплитудные структуры) и соседние структурные ловушки.

- Возможное изменение фильтрационно-емкостных и геомеханических свойств пластов-коллекторов ПХГ связанное с многократным приложением к ним знакопеременных нагрузок. Традиционная методика моделирования нефтегазовых месторождений предполагает построение распределения свойств по данным ГИС-бурение, и дальнейшее использование их

распределения в качестве неизменного параметра. В случае ПХГ в водоносном пласте это означает, что свойства пласта принимаются неизменными, причём такими, какими они наблюдались по скважинам ещё до начала их активной эксплуатации для закачки и отбора газа, и именно они используются на всех дальнейших этапах моделирования. Если в случае месторождения, из которого осуществляется только отбор углеводородов, при этом однократный, подобные изменения, как правило, настолько незначительны, что ими можно пренебречь, в случае длительной циклической эксплуатации ПХГ такие изменения свойств пласта со временем лишь накапливаются и могут достигать значимых величин [71], по крайней мере, в прискважинных областях. Традиционные алгоритмы геологического моделирования не позволяют учесть эти изменения.

- Противоречивость требований к детальности моделирования. Поскольку гидродинамическое моделирование ПХГ является сложной ресурсоёмкой задачей, увеличение детальности геологического моделирования существенно увеличивает вычислительные ресурсы и время, необходимые для проведения расчётов. Таким образом, существует острая потребность максимально возможного снижения детальности трёхмерной сетки геологической модели. В то же время, существует целый ряд факторов, требующих увеличения детальности трёхмерной сетки модели. Данный конфликт интересов делает задачу перемасштабирования трёхмерной сетки геологической модели крайне нетривиальной задачей, требующей для каждого объекта ПХГ поиска своего оптимального решения.

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

Обобщая приведённые выше факторы, можно утверждать, что наиболее специфичной является задача моделирования ПХГ в водоносном пласте. Задача моделирования объектов ПХГ в истощённых месторождениях намного ближе к традиционному моделированию месторождений. В то же время, за исключением приведённых выше различий, задача моделирования каких-либо объектов ПХГ принципиально не отличается от задачи моделирования нефтегазовых месторождений, позволяя использовать большинство методик и подходов, а также пакеты программ, изначально разработанных для их моделирования.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПХГ

Специфика объектов ПХГ, подходов к их исследованию и требований к моделям ПХГ, обуславливает особенности их геологического моделирования. Особенности эти зачастую сложно взаимосвязаны между собой, однако для удобства изложения можно условно выделить некоторые основные их группы:

- методы подготовки пространственных данных
- методы проверки и подготовки скважинных данных и петрофизического моделирования;
- методы выполнения межскважинной корреляции и структурного моделирования;
- методы получения количественных оценок на основе скважинных данных ПХГ и оценки достоверности результатов моделирования;
- методы моделирования распределения свойств в пространстве;
- методы ремасштабирования модели для гидродинамического моделирования;
- методы снижения неопределённости геологического моделирования, использования и уточнения геологических моделей

3.1 Методы подготовки пространственных данных при геологическом моделировании ПХГ

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 необходима их взаимная проверка и увязка. Данные процедуры не являются типовыми для современных продуктов геологического моделирования, традиционно рассчитанных на работу с уже проверенными и взаимоувязанными данными.

Первой задачей, решаемой ещё до этапа геологического моделирования, является 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 оказывается крайне слаб, что делает востребованным применение как полноценных геоинформационных систем общего назначения, таких как QGIS, так и специализированных, таких как Easy Trace. Это может потребоваться при

выполнении сопоставления и согласования разнородных пространственных данных разных лет и авторов, восстановлении местоположения ликвидированных скважин [21, 33] (Рисунок 47), необходимости проведения пространственной привязки и векторизации архивных материалов (Рисунок 48).

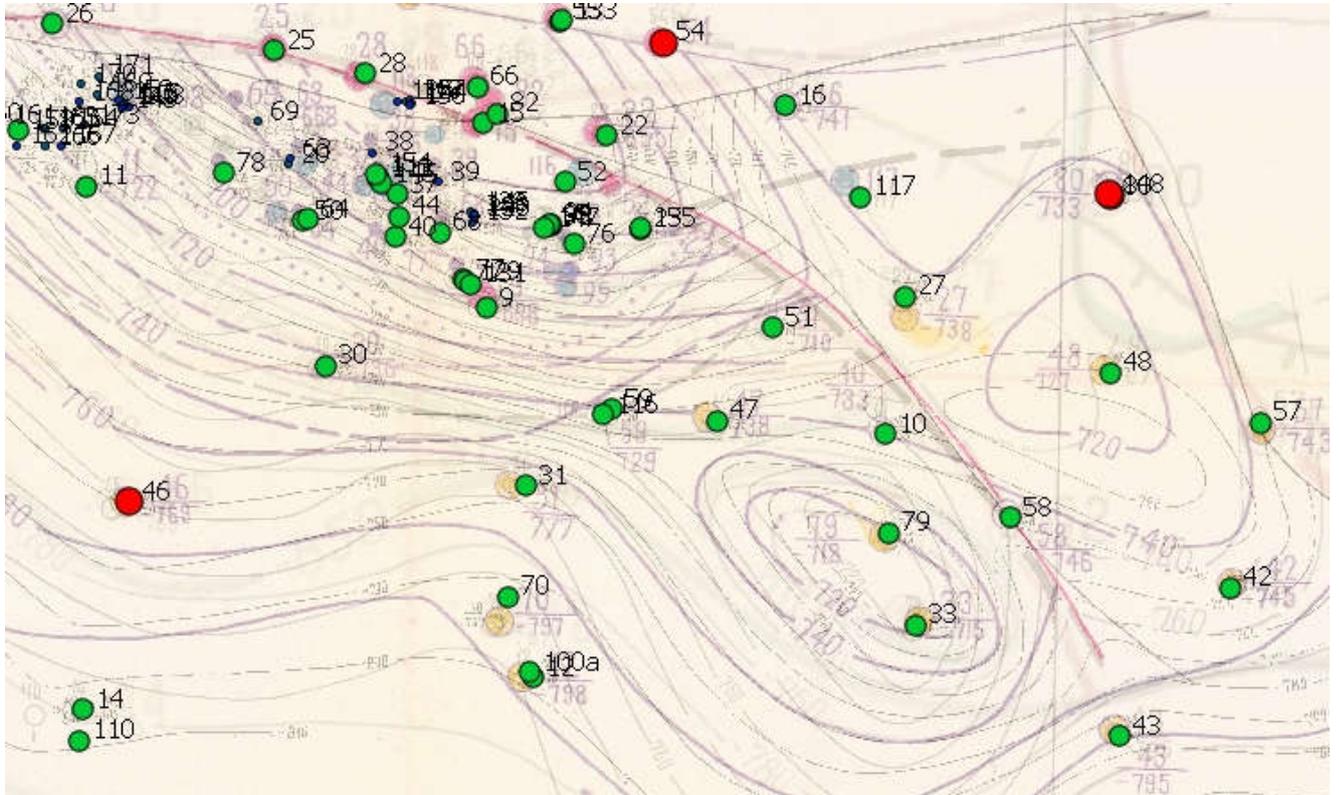


Рисунок 47 – Восстановленные положения ликвидированных скважин при сопоставлении карт за разные годы от разных авторов, приведённых к единой системе координат с помощью пространственной привязки в геоинформационной системе QGIS. Известные скважины отмечены зелёным, восстановленные – красным

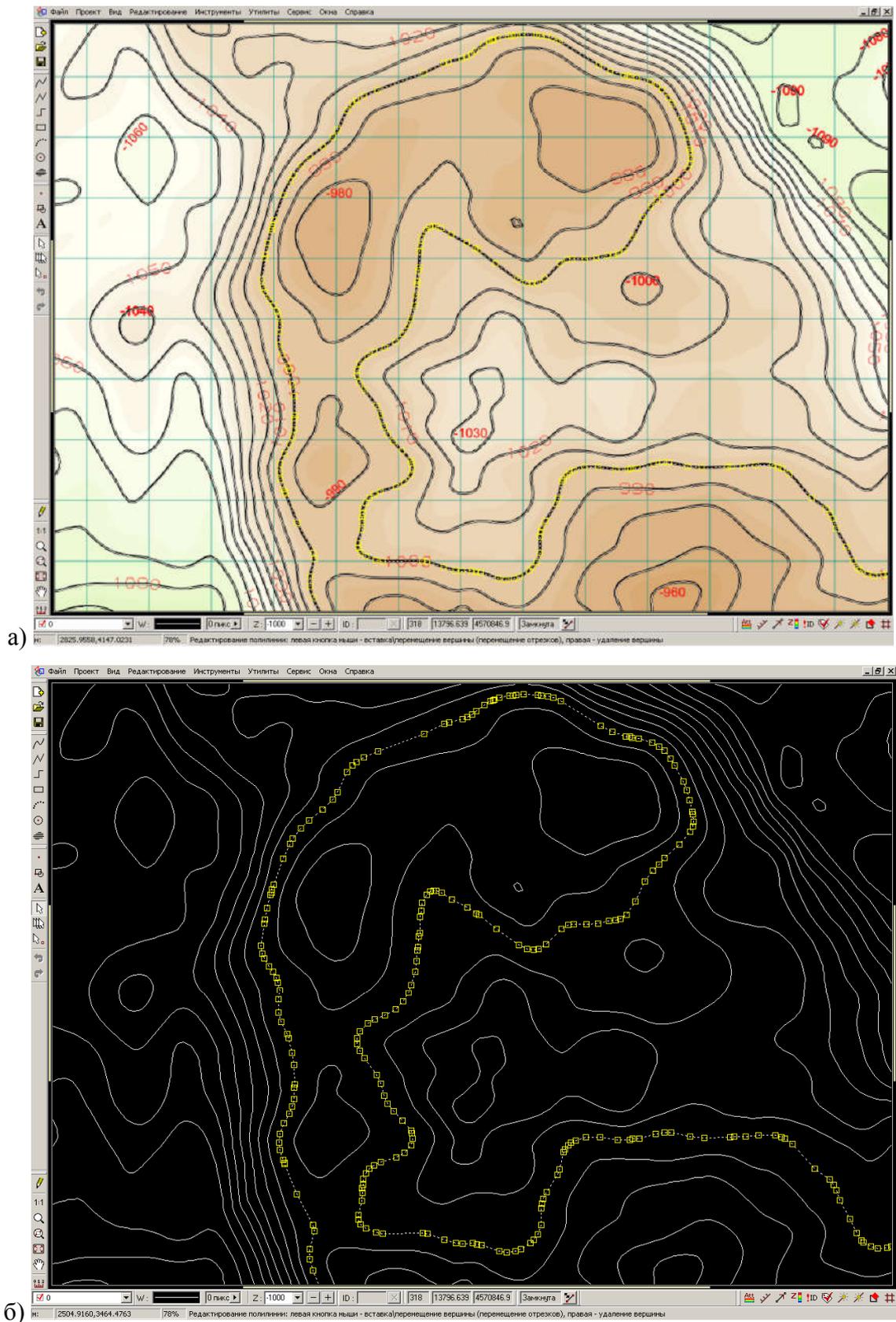


Рисунок 48 – автоматизированная векторизация растровых данных в системе Easy Trace: а – сопоставление результатов векторизации с исходной растровой основой, б – только результаты векторизации

3.2 Методы подготовки скважинных данных, выполнения межскважинной корреляции и структурного моделирования

Особенности данных методов обусловлены в первую очередь неоднородностью исходных данных по детальности, достоверности и полноте, обусловленных долговременностью эксплуатации ПХГ. В случае ПХГ в водоносных пластах дополнительным фактором является менее строгое отношение к хранению и обработке исходных данных, поскольку изначально, в отличие от месторождений, данные структуры являлись «пустыми» и не представляли высокого народно-хозяйственного интереса. В связи с этим может отсутствовать доступ ко всей полноте первичной информации, возможны неточности, потери материалов. В то же время, в случае ПХГ скважинные данные являются источником наиболее детальных и достоверных данных о геологическом строении объекта, особенно в случае объектов ПХГ в водоносных пластах с высокой внутренней литологической изменчивостью, когда разрешающая способность сейсморазведки оказывается принципиально недостаточна для использования в качестве опорной информации при структурных построениях или моделировании пространственного распределения свойств.

В условиях, когда расстояния между ближайшими скважинами объекта различаются на два-три порядка при общем их количестве в несколько сотен, типовые подходы к анализу скважинных данных и выполнению межскважинной корреляции, подразумевающих ручную навигацию между скважинами, становятся крайне непроизводительными. И, хотя в целом задача выполнения межскважинной корреляции к настоящему времени достаточно детально проработана [5, 75], подготовка скважинных данных ПХГ и их корреляция всё же требуют комплексного рассмотрения.

В общем случае, задача корреляции скважинных данных относится к этапу геологического моделирования и может рассматриваться отдельно. Но, в случае ПХГ, операции подготовки скважинных данных, выполнения межскважинной корреляции и петрофизического моделирования зачастую бывают значительно связаны между собой, из-за чего может быть целесообразным рассматривать их комплексно. Подобная специфика связана как с многовариантностью исходных структурных построений и наборов пластовых отбивок, так и с неоднородностью данных ГИС-бурение по информативности и полноте. Хотя индивидуальная и формальная проверка и подготовка скважинных данных может быть выполнена на предварительных этапах, задачи сопоставления скважинных данных в пространстве уже требуют выполнения этих операций в трёхмерной среде. Это касается в первую очередь операций проверки пластовых отбивок по данным ГИС-бурение и структурным построением прежних лет с одновременным контролем корректности привязки по глубине геофизических

материалов. Такая задача выполняется комплексно с учётом пространственной изменчивости регистрируемых по скважинным данным свойств и положения структурных поверхностей. Естественно, для этого в проекте геологического моделирования должны быть уже занесены координаты устьев скважин и их траектории, а также основные структурные поверхности, отбиваемые по данным ГИС, то есть фактически уже пройден этап подготовки пространственных данных и начато геологическое моделирование. В то же время окончательные этапы компоновки пакета информативных материалов ГИС и, в случае необходимости, подготовка сводного геолого-геофизического разреза могут быть выполнены только по результатам выполнения работ, формально относящихся к этапу петрофизического прогноза. Фактически, в случае моделирования ПХГ, ряд этапов подготовки исходных данных, петрофизического и геологического моделирования ведётся одновременно, с высокой связностью выполняемых рабочих процессов (Рисунок 49). При этом, поскольку проверка, подготовка и взаимная увязка исходных геолого-геофизических данных является ключевой фазой работы как геологов-моделистов, так и петрофизиков, на данном этапе может быть эффективна их совместная работа в единой команде.

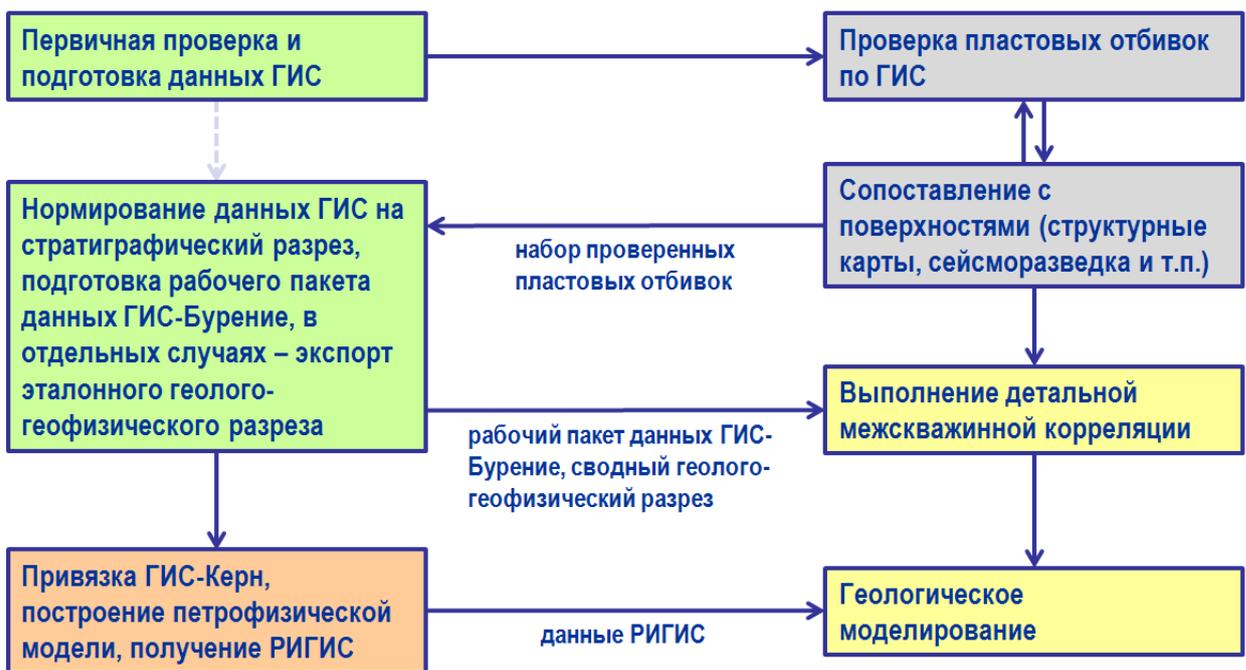


Рисунок 49 – общая последовательность операций подготовки скважинных данных и петрофизического моделирования ПХГ

Задачи петрофизического моделирования ПХГ, их специфика и подходы к их решению подробно изложены в работах [32, 62, 63], поэтому в данной работе детально не рассматриваются, однако некоторые операции, относящиеся к подготовке скважинных данных, всё же стоит упомянуть.

Корреляция скважинных данных длительно эксплуатируемых ПХГ подразумевает работу с архивными данными. При их оцифровке возможно возникновение различных погрешностей: ошибок оцифровки, наименования методов, некорректных склеек и т.п. Традиционные пакеты геологического моделирования ориентированы на работу с уже выверенным комплектом геофизических материалов, в то же время, наиболее производительная проверка может быть выполнена только в трёхмерной среде, особенно в случае высокоизменчивого разреза, неоднородного расположения скважин, их большого количества и неодинаковой полноте вскрытия разреза. Даже визуальная проверка исходных геофизических данных в большинстве современных коммерческих продуктов геологического моделирования реализована крайне слабо. При этом, в случае пропуска скважин с некорректными данными, особенно если ошибки на первый взгляд неочевидны, возможно возникновение проблем на этапе корреляции. Одним из способов решения данной задачи является применение инструментария проверки исходных скважинных данных, реализованного в отечественном пакете моделирования DV-Geo [59, 50], что позволяет применять его как систему первичного анализа и подготовки геолого-геофизических данных, даже в тех случаях, когда всё дальнейшее моделирование выполняется в других программных пакетах. Использование данного инструментария позволяет оперативно выявлять одиночные дефекты в больших объёмах неоднородно расположенных исходных данных, выявление которых при использовании традиционных средств крайне проблематично (Рисунок 50).

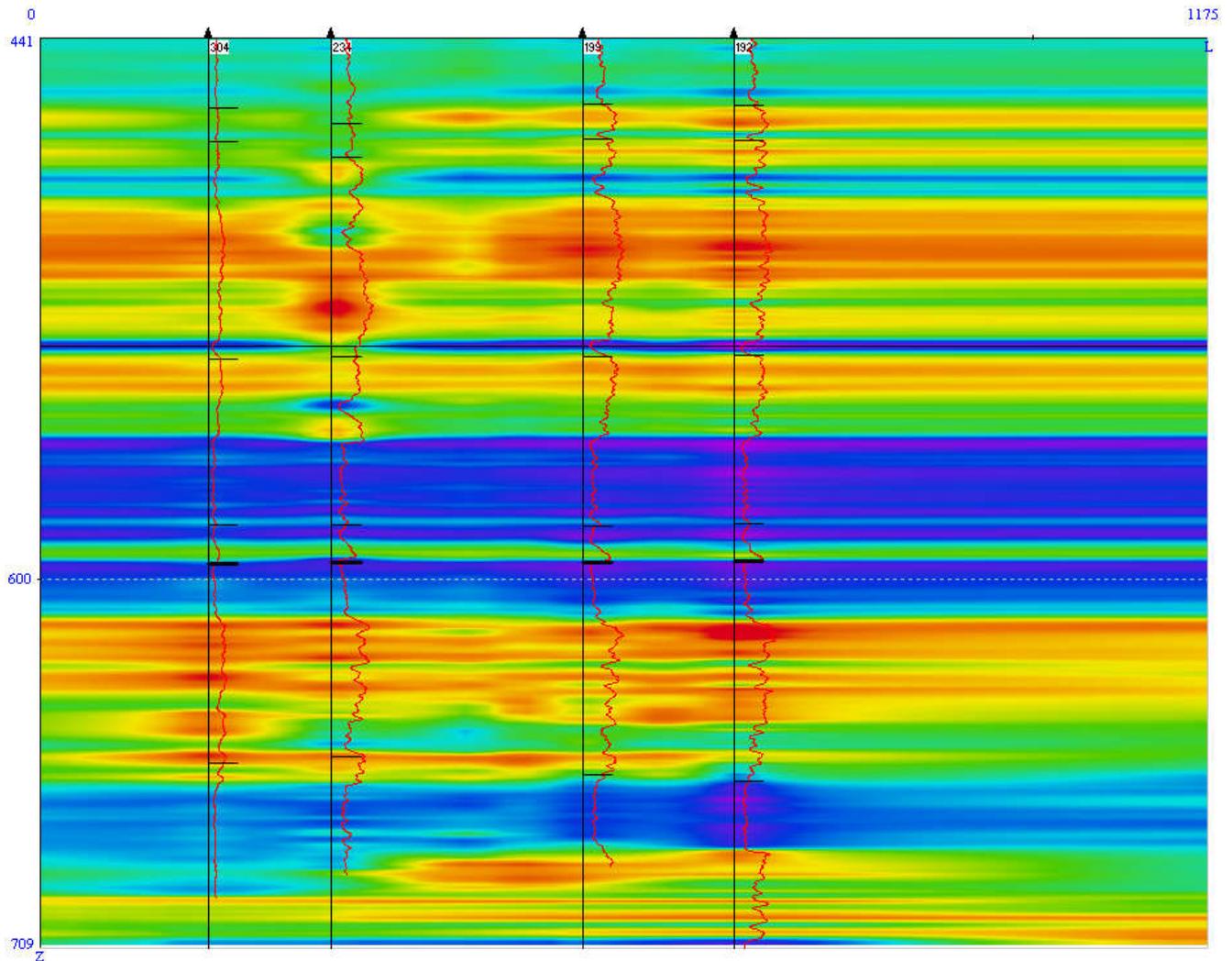


Рисунок 50 – Выявление «склейки» в записи каротажа (на профиле – вторая слева скважина) при оценке качества исходных данных в визуальной среде DV-Geo

На всех этапах моделирования крупных и неоднородно изученных объектов, достаточно актуальной является проблема навигации по таким моделям. При моделировании ПХГ в водоносных пластах она проявляется в крайне выраженной форме. В ведущих пакетах геологического моделирования инструментарий навигации по большому количеству неоднородно расположенных скважин всё ещё крайне слабо проработан, из-за чего в реальных ситуациях этап корреляции при моделировании ПХГ оказывается сложным и трудоемким. Некоторым исключением здесь являются отдельные отечественные программные продукты геологического моделирования, в частности уже упомянутый выше DV-Geo, поддерживающий автоматическое построение профилей и схем корреляции по заданной области (Рисунок 51, 52, 53).

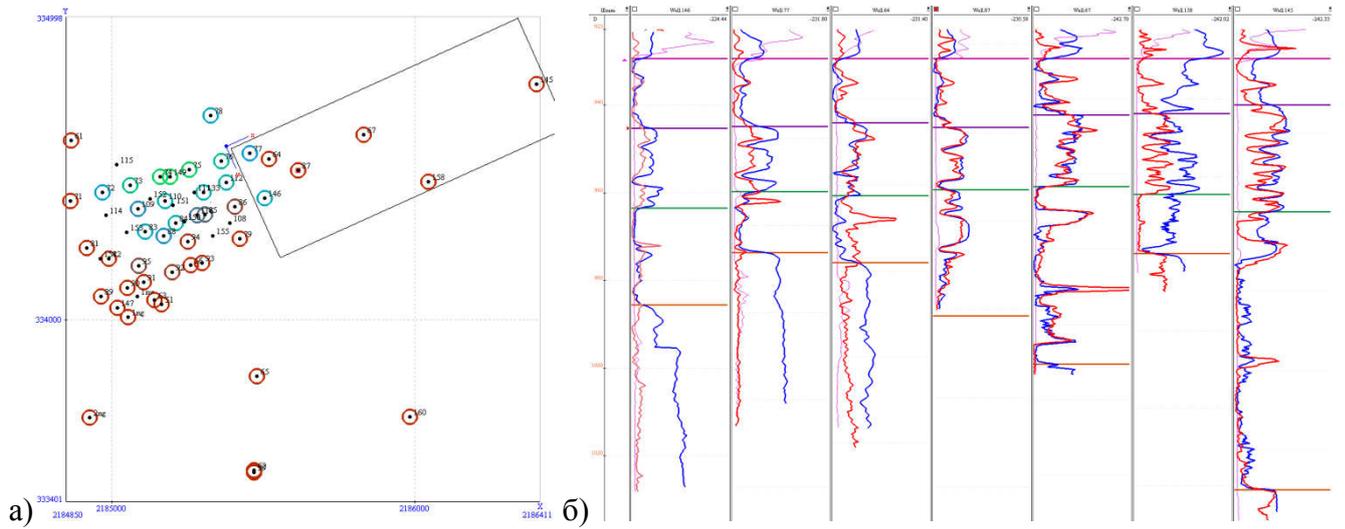


Рисунок 51 – проверка и корректировка отбивок в среде DV-Geo. а – выбор скважин интерактивной рамкой с учётом визуального отображения распределения глубин отбивок. б – схема корреляции, автоматически генерируемая для выбранных скважин

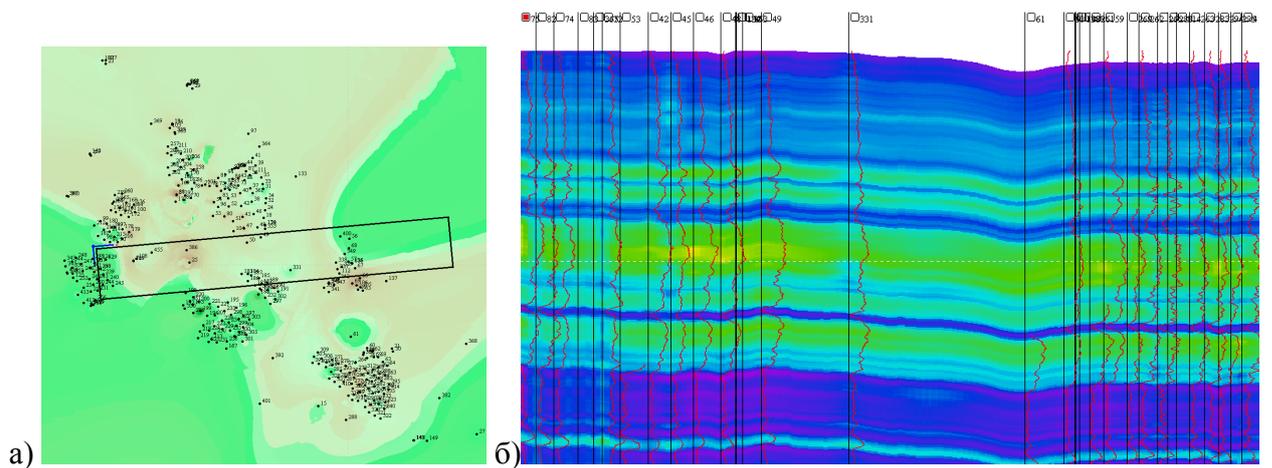


Рисунок 52 – оценка изменчивости скважинных данных ПХГ в водоносном пласте в визуальной среде пакета DV-Geo. а – выбор скважин интерактивной рамкой с учётом визуального отображения значений оцениваемого параметра по заданному сечению. б – визуальная среда корреляции, автоматически генерируемая для выбранных скважин

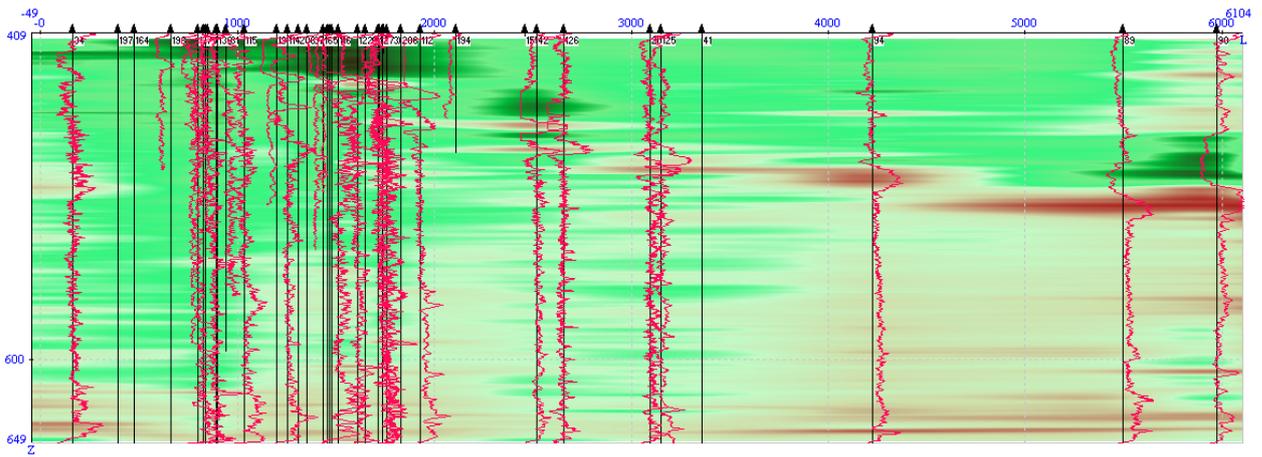


Рисунок 53 – оценка изменчивости в визуальной среде пакета DV-Geo для скважинных данных ПХГ в водоносном пласте при высокой неоднородности размещения скважин

В настоящее время существуют и развиваются системы автоматизированной и полуавтоматической корреляции скважинных данных, учитывающие и взаимное расположение скважин, и изменчивость комплекса зафиксированных в ней параметров. Такой подход реализован в таких системах как Autocorr, DV-Geo, позволяющих автоматизировать наиболее трудоёмкий процесс установления корреляционных связей с учётом взаимного положения скважин и пространственной изменчивости комплекса регистрируемых параметров. В случае ПХГ применимость такого подхода существенно осложняется неоднородностью полноты и качества скважинных данных, поскольку для его устойчивой работы необходимо наличие во всех скважинах достаточно однородного набора геофизических методов. В случае длительно эксплуатирующихся ПХГ из-за отличий применявшейся геофизической аппаратуры, методик регистрации и обработки данных, а также отдельных потерях в данных, возникающих при архивном хранении, возможны ситуации, когда при значительном общем объёме скважинных данных отсутствует однородный комплекс методов, который был бы информативен и устойчиво встречался бы по всему фонду скважин. При этом, в случае ПХГ в водоносных пластах комплекс проводимых геофизических исследований в целом беднее, чем выполняемых по месторождениям. В отдельных случаях возможна даже ситуация, когда в соседних скважинах встречаются практически несопоставимые комплексы ГИС, что затрудняет даже ручное выполнение корреляции специалистом-оператором. Все эти факторы накладываются на изначально присутствующую высокую внутреннюю изменчивость свойств пласта-коллектора и отдельных интервалов покрышки, характерную для терригенных разрезов. Одним из средств решения данной проблемы является расчёт сводного геолого-геофизического разреза объекта и введение его в модель в качестве эталонной скважины, используемой при корреляции.

Построение сводного геолого-геофизического разреза является традиционным приёмом изучения локальных геологических объектов, для которых можно выделить устойчивые

закономерности геологического строения. Традиционно данная процедура выполняется вручную экспертным методом, результатом её является графический материал, предназначенный также для экспертного использования. При этом, ручная подготовка данного материала делает его получение весьма ресурсоёмким, а графическое представление, предусматривающее только экспертное использование снижает эффективность его применения. Вместе с тем, автоматизированное его получение в цифровой форме вполне возможно, при этом использование полученного разреза в качестве набора геофизических материалов по «эталонной» скважине может существенно упростить процесс геологического изучения объекта и его дальнейшего геологического моделирования.

Первоначально необходимость разработки системы автоматизированного расчёта сводного геолого-геофизического разреза («нормального» разреза) возникла в ходе работ по созданию комплекса автоматизированного петрофизико-геологического прогнозирования «Векторный прогноз» [79, 16, 64], во многом опирающегося на идеи Вистелиуса [12, 13] и Клира [58]. Сама роль «нормального» разреза первоначально рассматривалась лишь как промежуточная – он использовался для привязки керновых данных и установления петрофизических зависимостей. Вместе с тем, последующая практика использования полученного комплекса при выполнении работ по моделированию объектов ПХГ показала самостоятельную ценность получаемого сводного геолого-геофизического разреза и возможность его использования для упрощения выполнения межскважинной корреляции при геологическом моделировании. Суть метода заключается в следующем:

- Исходные материалы ГИС-бурение проходят предварительное нормирование;
- Производится расчёт средних значений глубины всех основных структурных отбивок, которые в дальнейшем рассматриваются как отбивки по некоторой эталонной скважине;
- Нормированные скважинные данные масштабируются по глубинам фактических отбивок в скважинах на глубины отбивок в эталонной скважине;
- Совокупность данных ГИС-бурение каждого из геофизических методов по всем скважинам рассматривается как случайная функция, математическое ожидание которой заносится в нормальную скважину. Поскольку соотношение интервалов записи различных методов может быть очень неоднородным (различие отметок начала и окончания записи по разным скважинам, поинтервальная запись с перекрытием или без перекрытия интервалов, повторные записи того же метода), на практике для реализации данной операции как правило используются непараметрические процедуры фильтрации и сглаживания.

- Полученные в «нормальной» скважине значения геофизических параметров представляют собой предварительную версию сводного геолого-геофизического разреза данного объекта, необходимого для статистического нормирования на него каротажа по всем скважинам. Выполнение нормирования на эталонный разрез позволяет решить проблемы с неполными участками записи, для которых статистическое нормирование могло бы привести к получению аномальных значений. По нормированным таким образом исходным данным рассчитывается первая чистовая версия сводного геолого-геофизического разреза;
- При геологическом моделировании вне области моделирования создаётся траектория фиктивной скважины, куда заносится набор геофизических материалов и отбивок по эталонной скважине. При выполнении межскважинной корреляции в случае неуверенной корреляции, например, при несопоставимости их геофизических материалов, эталонная скважина может подключаться в качестве образца, демонстрирующего оператору общее для объекта распределение значений по всем методам;
- Поскольку расчёт нормального разреза происходит в полуавтоматическом режиме и сам по себе не трудоёмок, после уточнения схемы корреляции возможно выполнение повторного расчёта нормального разреза. Из-за исправления неточностей положения пластовых отбивок входящих в его состав скважин, общая конфигурация его уточнённой версии будет ещё более дифференцированной и информативной;
- При петрофизическом моделировании после установления связей ГИС-Керн существует возможность расчёта фильтрационно-емкостных свойств не только для фактических скважин, но и для нормального разреза, что тоже может быть использовано для визуализации общих закономерностей распределения свойств изучаемого объекта по глубине (Рисунок 54).

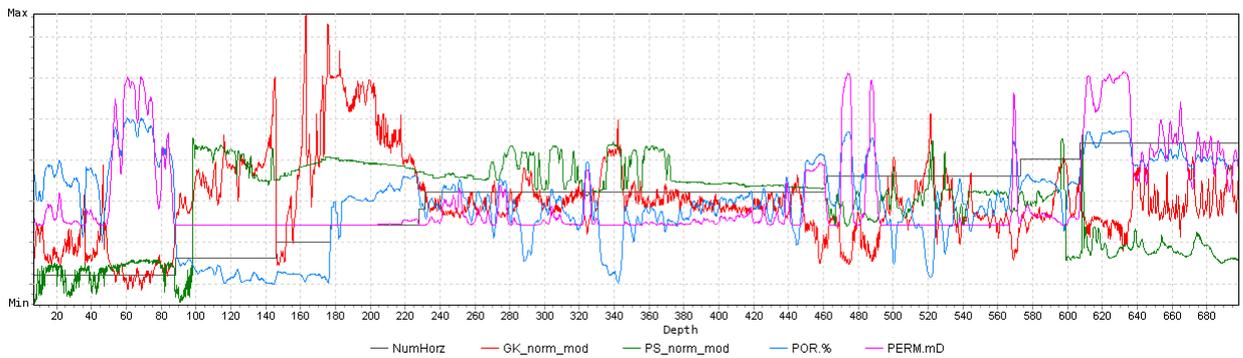


Рисунок 54 – Сводный геолого-геофизический разрез с эталонными глубинами границ горизонтов, показаниями геофизических методов и значениями фильтрационно-емкостных свойств, рассчитанный в системе «Векторный прогноз» для одного из объектов ПХГ в водоносном пласте

Несмотря на возможности автоматизации процесса корреляции, одной из наиболее существенных проблем, решаемых в ходе сопоставления скважинных данных ПХГ в водоносном пласте, является выделение границ 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 межскважинной корреляции, как правило, необходимо наличие двух реперов, 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 рисунке 55 показан пример корреляции неоднородного разреза щигровского горизонта, где кровля продуктивного пласта выделяется неоднозначно. Сложность выделения кровли коллекторской пачки связана с уплотнением 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 (Рисунок 56).

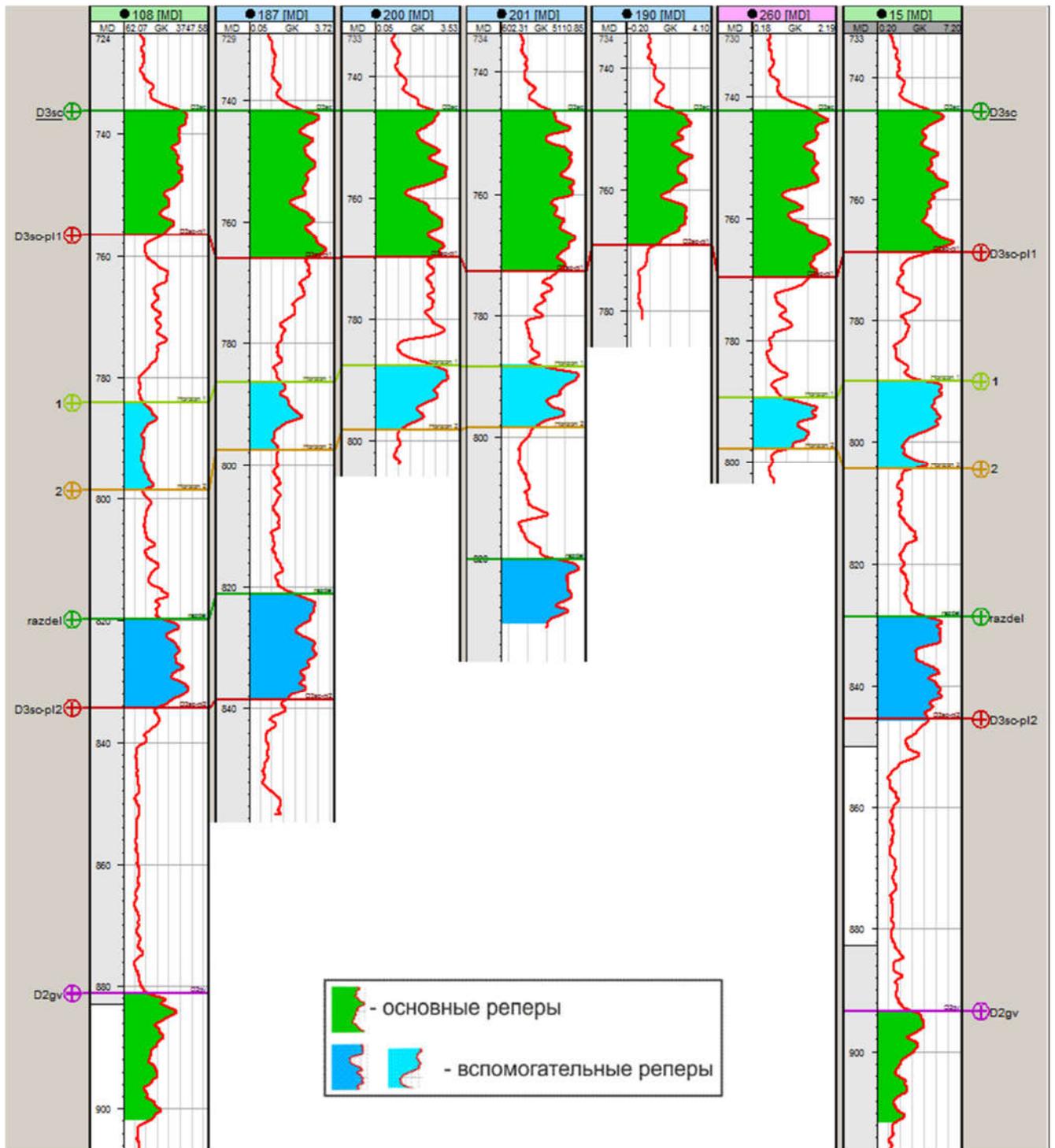


Рисунок 55 – пример корреляции неоднородного разреза щигровского горизонта

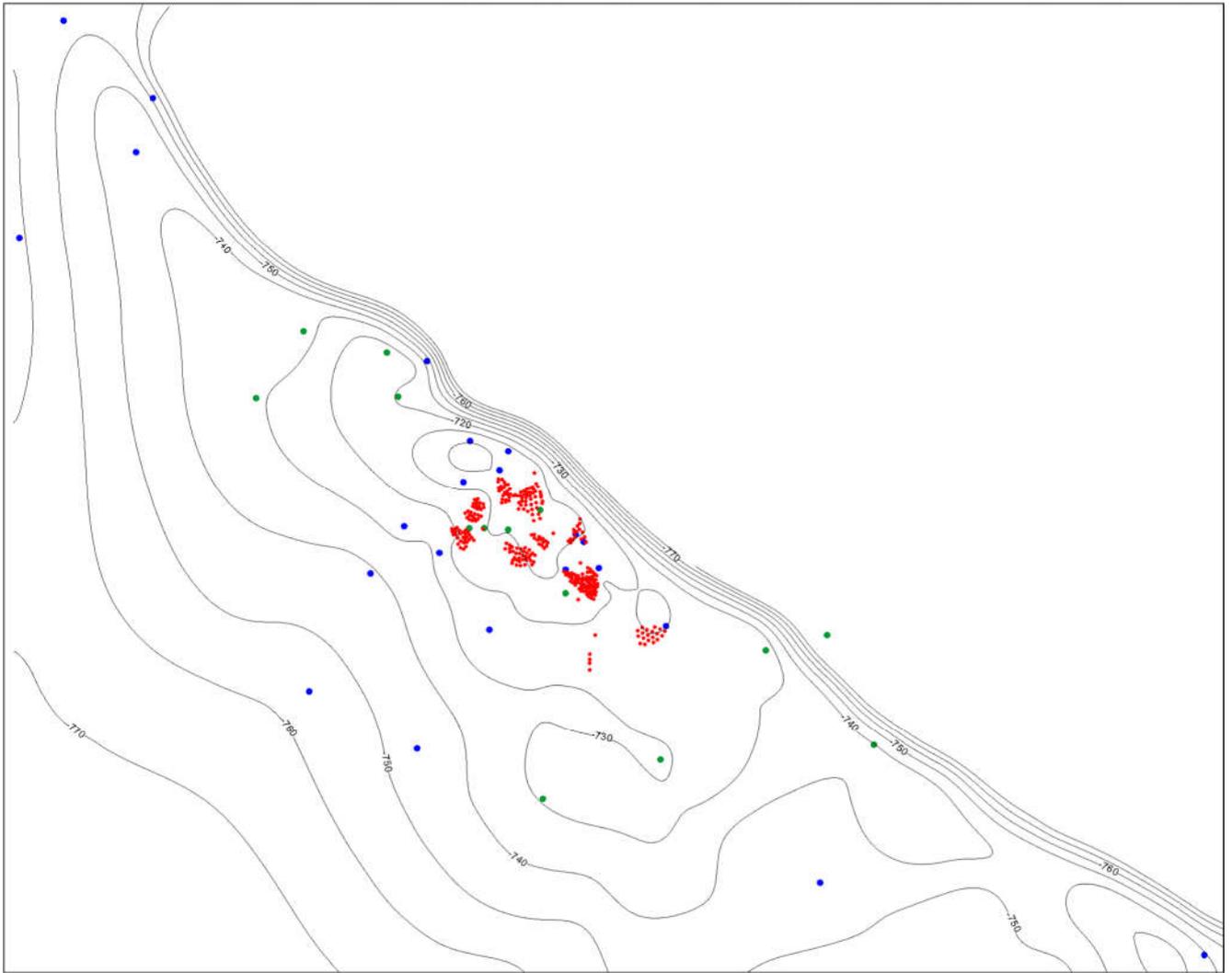


Рисунок 56 – площадь неоднородность вскрытия скважинами продуктивного разреза.
 Зелёные – вскрытие в разрезе всех реперов, синие – верхнего и промежуточного реперов,
 красные – только верхнего

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

Важным нюансом, который необходимо учитывать при моделировании ПХГ является различие между стратиграфическими и литологическими отбивками. Для терригенного разреза значительной части ПХГ в водоносном пласте характерно наличие непроницаемых перемычек в пласте коллекторе, глинизация его кровли, или наоборот наличие проницаемых прослоев в пласте-покрышке. При первоначальном изучении объекта часто происходит отбивка границ пластов-коллекторов по признаку коллектор/неколлектор, то есть по литологическим границам.

Хотя построения на основе таких отбивок могут быть удобны для понимания объекта, эти границы часто не могут быть основой для построения геологической модели, поскольку отображают лишь распространение коллекторских свойств, а не поверхности моделируемых стратиграфических интервалов. Стратиграфические отбивки используются для построения каркаса трёхмерной модели, от распределения ячеек которого зависит корректность дальнейшей интерполяции свойств в межскважинном пространстве. Если опесчаненные или заглинизированные интервалы в кровле пласта коллектора интерпретировать как локальные поднятия или опускания его поверхности, произойдет соединение гидродинамически изолированных интервалов. Помимо того, что в любом случае полученная схема проведения границ будет отражать лишь субъективную точку зрения оператора-моделиста (геолога, геофизика), выполнявшего корреляцию, в ряде случаев даже нет возможности проследить все традиционно выделяемые на объекте «пласты» во всех скважинах ПХГ. Литологические тела, изначально рассматриваемые как «пласты» реально могут прерываться, объединяться и разделяться, представляя собой более сложную систему (Рисунок 57).

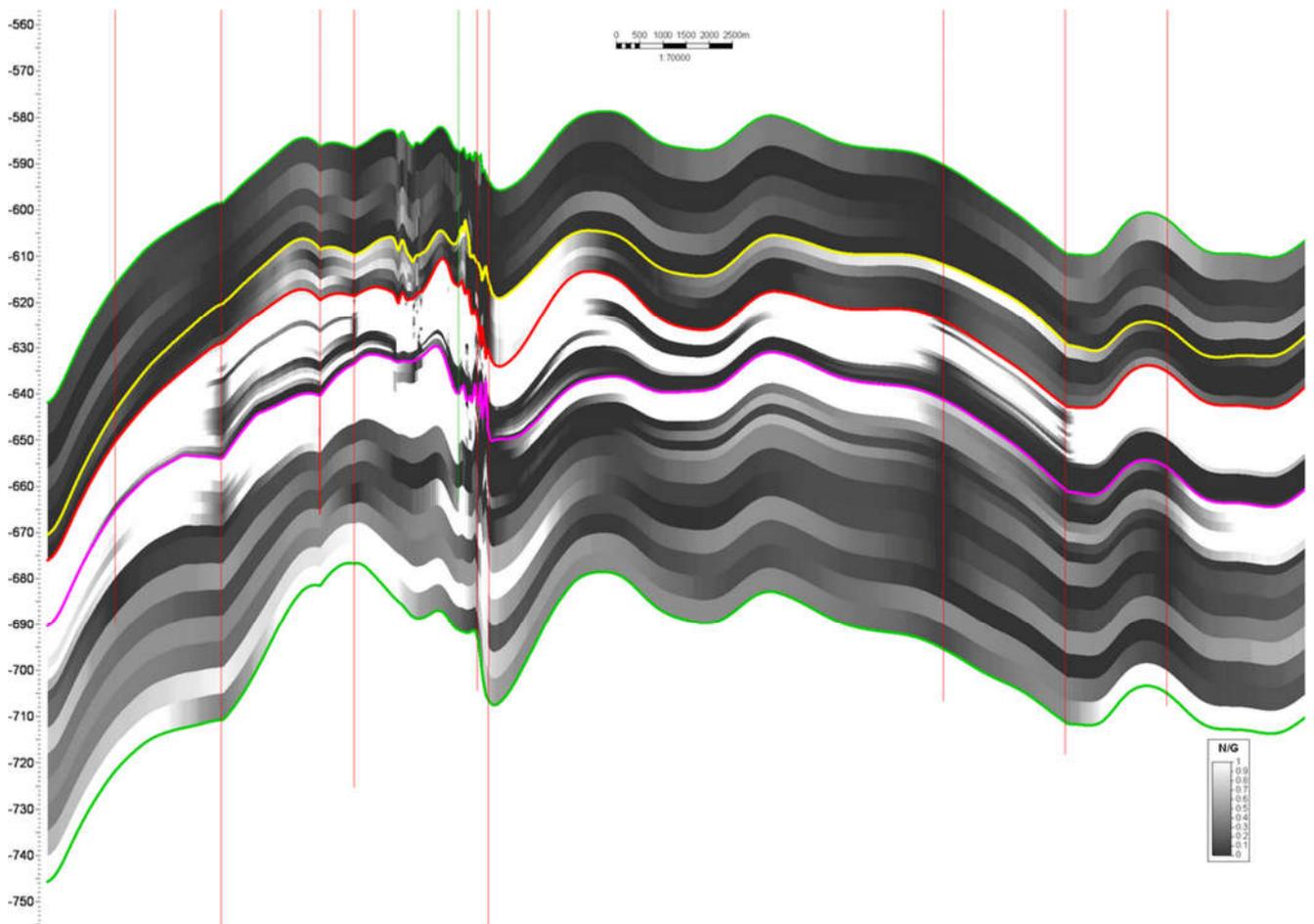


Рисунок 57 – Вертикальная неоднородность разреза ПХГ в водоносном пласте, обусловленная литологической изменчивостью, на примере распределения параметра доли коллекторов (NTG)

В то же время, в большинстве случаев при моделировании внутренней литологической изменчивости объектов ПХГ, созданных в терригенных коллекторах опереться на какие-либо данные помимо скважинных геофизических исследований не представляется возможным. Это связано с тем, что результаты гидродинамических испытаний дают лишь интегральные оценки свойств прилегающих областей, а разрешающая способность современных методов площадной геофизической съёмки (сейморазведки, электроразведки, гравимагнитной съёмки и т.п.) несопоставимо ниже разрешающей способности скважинных геофизических исследований (Рисунок 43), что делает их принципиально непригодными для решения данной задачи.

В ряде случаев, достоверный результат моделирования внутренней литологической изменчивости таких объектов может быть получен при выделении лишь опорных стратиграфических отбивок с интерполяцией свойств между ними согласно заданной схеме разбиения на ячейки трёхмерной сетки, воспроизводящей характер осадконакопления толщи (при согласном залегании – пропорциональное разбиение). Такой подход позволяет существенно снизить объём субъективных построений, одновременно получив более достоверную модель. Хотя формально данное решение следовало бы отнести к методам интерполяции свойств, его использование призвано решать задачу связанную именно с корреляцией, снижая трудоёмкость и повышая эффективность данного этапа моделирования в ситуации моделирования высокоизменчивых терригенных пластов-коллекторов при имеющейся неоднородности распределения скважинных данных.

3.3 Методы организации технологических процессов петрофизического моделирования

Как было показано выше, работа со скважинными данными ПХГ в водоносных пластах имеет ряд специфических черт, делающих эффективным комплексное решение задач подготовки скважинных данных, выполнения (уточнения) корреляции и петрофизического моделирования.

Задача подготовки скважинных данных настолько тесно связана с задачей петрофизического моделирования, что во многих случаях удобнее рассматривать их совместно. Хотя в целом этап петрофизического моделирования, как правило, рассматривается как предшествующий этапу геологического моделирования, на практике ряд этапов проверки и уточнения данных для петрофизического моделирования целесообразно выполнять, загрузив их в геологическую модель. Так, хотя индивидуальная и формальная проверка скважинных данных может быть выполнена на предварительных этапах подготовки скважинных данных для петрофизического моделирования, задачи сопоставления скважинных данных в пространстве уже требуют выполнения этих операций в трёхмерной среде, для чего необходимо занесение

скважинных данных в трёхмерную модель. Это касается в первую очередь задач проверки пластовых отбивок по данным ГИС-бурение и структурным построением прежних с одновременным контролем корректности привязки по глубине геофизических материалов. Такая задача выполняется комплексно с учётом пространственной изменчивости регистрируемых по скважинным данным свойств и положения структурных поверхностей. Естественно, для этого в проекте геологического моделирования должны быть уже занесены координаты устьев скважин и их траектории, а также основные структурные поверхности, отбиваемые по данным ГИС-контроль, то есть фактически уже пройден этап подготовки пространственных данных и начато геологическое моделирование.

По соотношению результативности к трудозатратам наиболее эффективным подходом к работе со скважинными данными является пакетная обработка, реализованном как в геофизических пакетах общего назначения, таких как Schlumberger Techlog, CGG PowerLog и т.п., так и специализированных программных комплексах, адаптированных на работу со скважинными данными ПХГ, такие как «Векторный прогноз» [63, 62]. Непосредственно методики, лежащие в основе данных систем, детально рассмотрены в работах соответствующих авторов, здесь же остановимся на вопросах, касающихся подготовки исходных данных для обеспечения возможности выполнения пакетной обработки и специфических требованиях к результатам петрофизического прогноза.

Основными формами предоставления результатов петрофизического прогноза является поточечный и поинтервальный. Поточечный приписывает определённые значения фильтрационно-емкостных свойств каждому дискрету каротажа, фактически формируя непрерывные кривые прогнозируемых свойств, поинтервальный - приписывает определённые значения некоторым интервалам, имеющим близкие свойства (Рисунок 58).

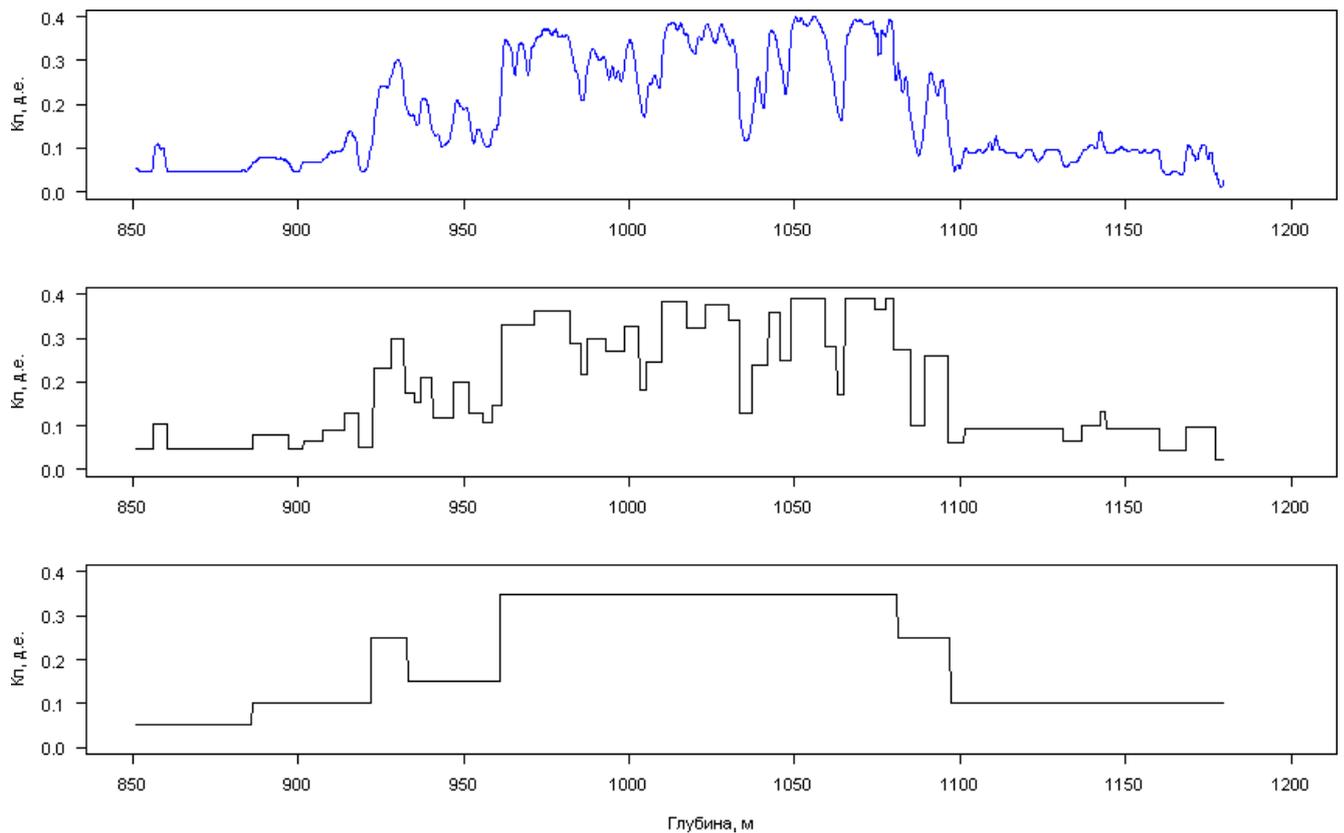


Рисунок 58 – пример результатов прогноза в поточечной форме (сверху) и поинтервальной форме различной степени детальности. Для наглядности, приведённые поинтервальные результаты получены синтетически на основе поточечных

В современной литературе, посвящённой геологическому моделированию, обе формы представления данных рассматриваются в качестве равноприменимых (характерно для отечественных изданий), либо рассматривается только поточечная, а поинтервальная игнорируется (характерно для зарубежных). В обоих случаях собственно вопросы применимости поинтервальных результатов оказываются вне рассмотрения, оставаясь практически не проработанными. Вместе с тем, на практике с такими результатами иногда приходится сталкиваться, поэтому систематизация присущих им ограничений представляется достаточно актуальной.

Говоря о применимости поинтервальных данных, следует разделять результаты детальной и оперативной обработки. Результаты детальной обработки ориентированы на использование при построении геологической модели и подсчёте запасов. С этим связана их достаточно высокая детальность, обоснованность критериев выбора границ интервалов и применяемых методик интерпретации. В отечественной практике такие данные до настоящего времени широко используются при выполнении работ по подсчёту запасов. По всей видимости, в большинстве случаев, когда речь идёт об использовании при геологическом моделировании результатов в поинтервальной форме, подразумеваются именно такие данные.

Другим, не менее распространенным типом поинтервальных данных являются результаты оперативной обработки. В отличие от результатов детальной обработки, они носят лишь предварительный характер и, как правило, достаточно грубы. Все недостатки, присущие поинтервальной форме представления данных, у этих результатов представлены наиболее ярко. В то же время, в ряде случаев они оказываются единственным доступным источником данных, характеризующих свойства объекта. Например, такая ситуация зачастую возникает при геологическом моделировании подземных хранилищ газа в водоносных пластах. Слабая освещённость в литературе вопросов использования поинтервальных данных зачастую приводит к использованию результатов оперативной обработки в качестве исходных данных для различных расчётов и моделей. В настоящее время, с распространением трёхмерного моделирования, эта проблема лишь усугубилась.

Наиболее очевидным недостатком данных в поинтервальной форме является более низкая детальность. Степень детальности результатов детальной обработки, как правило, приемлема и обоснована соответствием расчленению разреза; детальность результатов оперативной обработки обычно не обосновывается и является существенно более низкой. Вопросы детальности обычно затмевают собой остальные проблемы, в связи с чем проблематичность использования поинтервальных данных зачастую недооценивается. В ряде случаев это может приводить к некорректности геологических и гидродинамических моделей, построенных на основе таких данных, и, как следствие, принятию ошибочных производственных решений.

Характерными особенностями поинтервальной формы предоставления данных, иногда рассматриваемыми как её преимущества, являются возможность проводить интерпретацию вручную с минимальным привлечением каких-либо средств автоматизации и компактность записи получаемых результатов, позволяющая приводить их непосредственно в тексте различных отчётов.

На практике, выдача результатов в поточечном виде является лишь побочным эффектом от применения специализированных средств автоматизации, основной же их пользой является повышение производительности работы и получение более достоверных результатов, что достигается благодаря унификации используемых методик, исключению влияния субъективных факторов, применению более совершенных математических алгоритмов прогноза свойств [63, 62]. В связи с этим отказ от их использования и выполнение интерпретации «вручную» в большинстве случаев не может рассматриваться в качестве преимущества. Единственным существенным исключением является случай, когда исходные данные имеют настолько низкое качество, что какая-либо автоматизированная интерпретация их представляется невозможной.

По компактности записи поинтервальные результаты действительно существенно превосходят поточечные. Так, например, для записи результатов прогноза по скважине глубиной 1000м при поточечном прогнозе с шагом дискретизации 0.2м потребуется 5000 строк, в то время как поинтервальная запись этих же результатов при незначительной расчленённости разреза может потребовать всего нескольких десятков строк. В то же время, наличие у поинтервального прогноза ряда принципиальных недостатков, позволяет рассматривать компактность записи его результатов скорее не как положительное качество, а как фактор, осложняющий скорейший полный отказ от его использования.

Выдача результатов в поинтервальном виде характерна для работ, выполняемых интерпретатором вручную. Для каждой из скважин интерпретатор должен принять значительное количество субъективных решений: на основании каких данных вести прогноз, какие использовать пластовые отбивки, какого размера брать интервалы для предоставления результатов, где проводить их границы, каким образом рассчитывать среднее значение по интервалу. Зачастую, в угоду человекочитаемости, средние значения интервалов и глубины их границ округляются с шагом в 0,1, 0,2 или 0,5 до ближайших «красивых» чисел. При этом, результаты, полученные в различные годы и различными интерпретаторами, могут существенно расходиться как по принимаемым разбивкам интервалов, так и по прогнозируемым в них значениям. Из-за различия методик интерпретации характер связей между исходными геолого-геофизическими данными и прогнозными значениями в различных скважинах может различаться. Из-за того, что при поинтервальном прогнозе одному уровню выходного параметра соответствует множество комбинаций значений исходных параметров, даже сам анализ этих связей оказывается затруднён. В то же время, для поточечного прогноза такая проблема не характерна, поскольку для получения поточечных результатов необходимо использование средств автоматизированной обработки геолого-геофизических данных, для большинства из которых наиболее рациональным является комплексная обработка данных по единой методике (Рисунок 59).

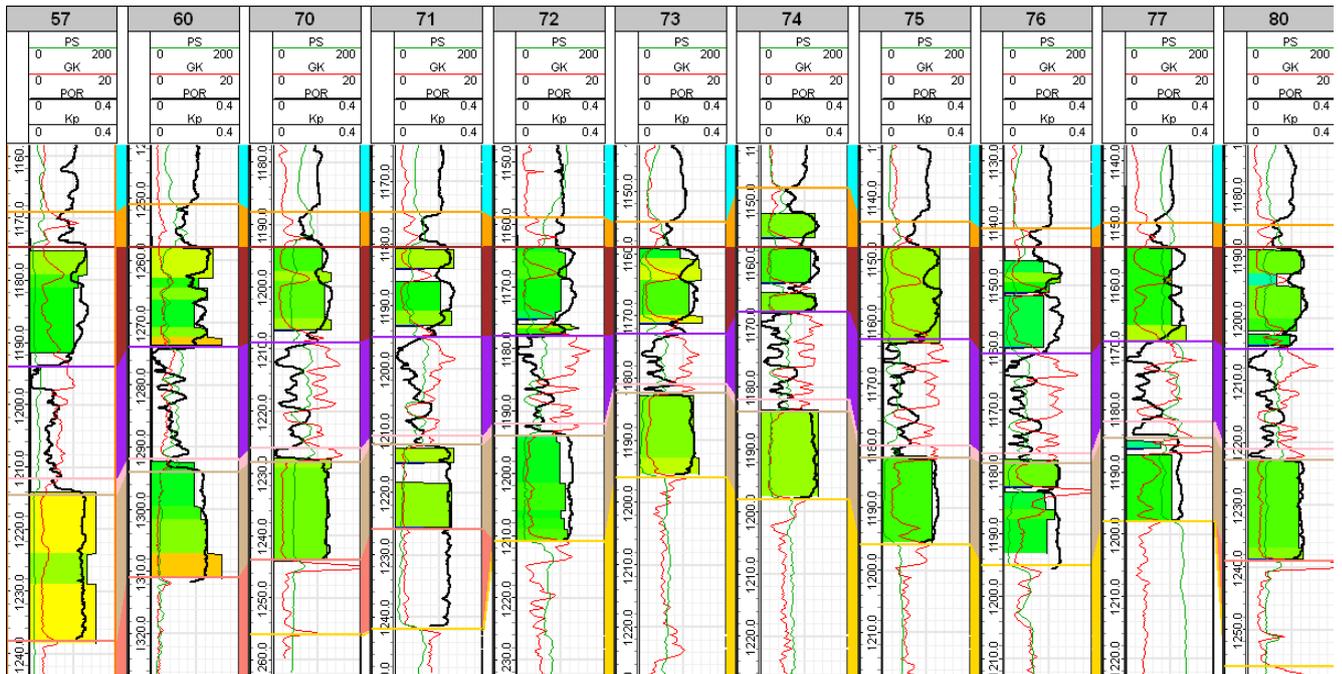


Рисунок 59 – сопоставление результатов поинтервального (цветовая заливка) и поточечного (чёрная кривая) прогноза пористости, выполненного различными авторами для одного и того же объекта ПХГ в водоносном пласте

Единственным эффективным способом проверки результатов петрофизического моделирования является независимое построение ещё одной петрофизической модели, что в большинстве случаев слишком трудозатратно. Проверка на этапе гидродинамического моделирования хотя и возможна, но является косвенной, поскольку учитывает влияние также и множества дополнительных факторов. Кроме того, в случае выявления некорректности петрофизической модели на этапе гидродинамического моделирования, потребуется перестройка и петрофизической, и геологической, и гидродинамической моделей, что является более трудозатратным, чем перестройка только лишь петрофизической. Таким образом, наиболее желательным является обеспечение корректности результатов петрофизического моделирования ещё до начала построения геологической модели. В то же время, поскольку само петрофизическое моделирование зачастую выполняется сторонней организацией, необходимо обеспечивать экспресс-контроль получаемых результатов. В случае, если результаты предоставляются в поинтервальном виде, данная возможность оказывается крайне ограничена. Если в случае ручной интерпретации материалов ГИС-контроль некоторые нестыковки в получаемых результатах ещё могут быть выявлены при взаимном сопоставлении результатов за разные годы (Рисунок 60), для результатов петрофизического моделирования такая возможность отсутствует.

Интервал, м			Дата замера / Кг, %							
от	до	h	03.01	05.02	12.04	02.05	12.05	02.06	05.07	10.08
1010.4	1010.6	0.2								
1010.6	1011.2	0.6								30
1011.2	1012.0	0.8			40		45	35	60	30
1012.0	1012.2	0.2			40		45	35	60	75
1012.2	1013.2	1.0	30	45	40	25	45	35	60	75
1013.2	1013.6	0.4	30	45	40	25	45	35	60	50
1013.6	1014.4	0.8	50	45	40	25	45	35	50	50
1014.4	1014.6	0.2	50	45					50	50
1014.6	1015.8	1.2	50	45						50
1015.8	1016.0	0.2	50	45						
1016.0	1021.2	5.2								

Интервал, м			Дата замера / Кг, %				
от	до	h	10.97	06.98	01.99	01.00	07.04
1020.0	1020.2	0.2	76	65	74	68	
1020.2	1022.8	2.6	76	65	74	68	73
1022.8	1022.9	0.1	21		32	19	73
1022.9	1023.4	0.5	21		32	19	
1023.4	1024.0	0.6	21		32		
1024.0	1024.2	0.2	21		32	53	
1024.2	1024.5	0.3	40	30	57	53	
1024.5	1025.4	0.9	40	30	57	53	48
1025.4	1025.5	0.1			28		48
1025.5	1026.4	0.9			28		23
1026.4	1026.7	0.3					23
1026.7	1030.4	3.7					

Интервал, м			Дата замера / Кг, %				
от	до	h	07.03	10.05	04.06	11.06	08.08
1023.4	1024.0	0.6	76				80
1024.0	1025.8	1.8	76	85	75	80	80
1025.8	1026.0	0.2	76	85			
1026.0	1026.2	0.2		85			
1026.2	1028.0	1.8					
1028.0	1029.6	1.6		40	30	30	
1029.6	1030.0	0.4	52	40	30	30	60
1030.0	1030.3	0.3	52	85	70	70	60
1030.3	1030.8	0.5	52	85	70	70	30
1030.8	1031.2	0.4	52	45	35	15	30
1031.2	1032.2	1.0	46	45	35	15	30
1032.2	1032.4	0.2	46	45	35	15	
1032.4	1032.7	0.3	46	45			
1032.7	1033.0	0.3	46				

Интервал, м			Дата замера / Кг, %			
от	до	h	10.05	04.06	11.06	08.08
1017.2	1017.4	0.2				85
1017.4	1020.1	2.7	77	72.5	78	85
1020.1	1020.2	0.1	77	72.5	78	
1020.2	1020.3	0.1	77		78	
1020.3	1020.4	0.1	77			
1020.4	1021.6	1.2				
1021.6	1022.3	0.7		22.5	30	40
1022.3	1022.5	0.2		22.5		40
1022.5	1023.0	0.5		22.5		
1023.0	1023.6	0.6		22.5		30

Рисунок 60 – выявление незакономерной динамики газонасыщенности по данным ГИС-контроль в результате сопоставления прогнозных значений газонасыщенности по последовательностям исследований

Другая проблема при использовании поинтервальных результатов связана со сложностью уточнения пластовых отбивок в ходе геологического моделирования. На этапе подготовки данных к геологическому моделированию как правило существует возможность обобщения и комплексирования имеющейся геолого-геофизической информации. В частности, как было показано в Главе 3.2, в настоящее время существуют мощные программные средства, позволяющие производить проверку корректности выделения пластовых отбивок с помощью анализа их пространственной изменчивости и соответствия данным ГИС-бурение. Выполнение данных процедур позволяет унифицировать критерии выделения отбивок по геофизическим кривым, провести корректировки отдельных отбивок, заполнить отдельные пропуски. В результате, это позволяет существенно повысить общую достоверность получаемой в дальнейшем геологической модели. Сама проверка может выполняться как в ручном режиме с использованием штатных инструментов, имеющихся в пакете геологического моделирования, так и интерактивно, с использованием специализированных средств. Эффект от применения автоматизированных процедур упорядочения и взаимной проверки данных в отдельных случаях может быть весьма существенным. Например, для пластов-коллекторов объектов ПХГ в водоносном пласте, имеющих крайне неоднородное строение как пласта-коллектора, так и покрышки, единообразное выделение отбивок кровли ручным способом является крайне

проблематичным и может оставаться дискуссионным, несмотря на десятилетия эксплуатации и неоднократно предпринимавшиеся ранее попытки пересмотра их положения. Поскольку без применения специализированных средств автоматизации интерпретатору практически невозможно оперировать всей совокупностью имеющейся геолого-геофизической информации, при «ручной» обработке материалы по каждой из скважин чаще всего рассматриваются им по отдельности. В этом случае пересмотр положения пластовых отбивок и границ интервалов происходит постепенно, по отдельным скважинам и группам скважин, при этом некоторые скважины, иногда даже близко расположенные, могут ускользать из его внимания. В связи с этим, на момент создания модели, имеющиеся критерии проведения некоторых границ зачастую бывают недостаточно единообразны, требуя упорядочения.

В результате уточнения отбивок, в случае использования результатов поточечного прогноза, как правило, не возникает каких-либо негативных последствий. В ряде случаев соответствие распределения прогнозных значений фильтрационно-емкостных свойств и положения пластовых отбивок может даже увеличиваться. При поинтервальном же прогнозе, где границы интервалов, как правило, опираются на первоначально принятые отбивки, даже незначительное уточнение отбивок приводит к возникновению противоречий между характером изменения прогнозных свойств и уточнёнными границами. Например, если при уточнении границы кровли пласта-коллектора его отбивка сдвигается вверх, в кровле пласта образуются интервалы с нулевыми значениями пористости и проницаемости. Если аналогично она сдвигается вниз, возникает интервал с аномально высокими коллекторскими свойствами в крышке (Рисунок 61).

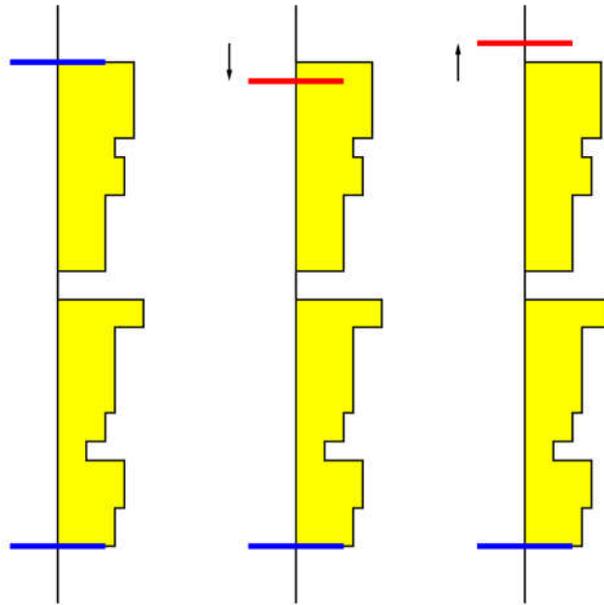


Рисунок 61 – схема возникновения противоречий между поинтервальными прогнозными значениями свойств и пластовыми отбивками. Синие отбивки – использовавшиеся при проведении поинтервального прогноза в качестве опорных, красные – откорректированные.

Слева – исходное состояние, в центре и справа – возможные результаты коррекции

Дополнительно ситуация осложняется тем, что зачастую при поинтервальном прогнозе определённые значения параметра присваиваются лишь интервалам с хорошими коллекторскими свойствами. В этом случае пласт-покрышка и слабопроницаемые интервалы пласта-коллектора рассматриваются как имеющие нулевую пористость и проницаемость, что фактически является аналогом допущения о полном отсутствии какой-либо гидродинамической связи с вышележащими и нижележащими отложениями. Поскольку пористость и проницаемость большинства реальных отложений всё же отлична от нуля, «обнуление» всегда будет занижать значения реальных фильтрационно-емкостных свойств. Таким образом, можно говорить о смещённости прогнозных свойств в интервалах с наименьшими значениями. Естественно, смещённость свойств по скважинам приводит к смещённости оценок по объекту, искажая оценку его порового объёма. Поскольку такое «обнуление» происходит одновременно с генерализацией, внутрь «обнулённых» интервалов могут также попадать маломощные прослой с улучшенными коллекторскими свойствами. Это вызывает ещё большее расхождение прогнозных результатов с реальными свойствами пласта, что может стать очевидным, например, в случае дальнейшего выявления по данным ГИС-контроль газонасыщенных интервалов в таких областях. Кроме того, после уточнения пластовых отбивок подобный интервал с нулевой пористостью и проницаемостью может попасть внутрь пласта с ожидаемо хорошими коллекторскими свойствами.

Несмотря на наличие ряда рассмотренных выше проблем, для отдельных видов работ результаты поинтервального прогноза могут быть применимы наравне с поточечными. В первую очередь это задачи двумерного моделирования, либо сводящиеся к таковым, например, задачи построения карт поплавковых средних значений, использующие скважинные данные лишь в усреднённом виде. Равная применимость обеспечивается (в случае единства методики интерпретации) близостью групповых статистических характеристик: минимального и максимального значений, математического ожидания, стандартного отклонения и др. (Рисунок 62).

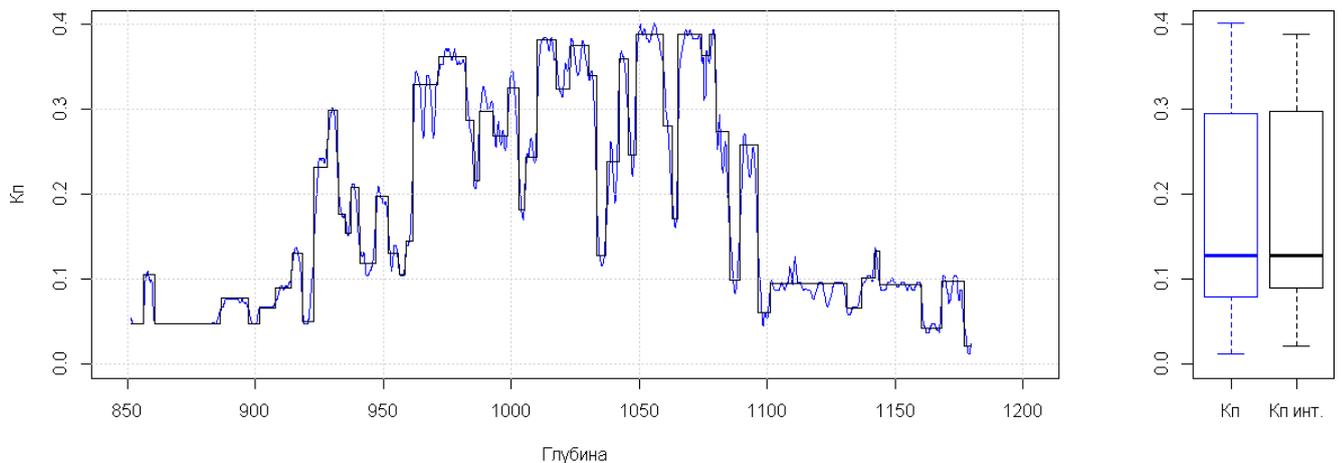


Рисунок 62 – сопоставление результатов в поточечной и поинтервальной форме и их распределений

Хотя дискретность распределений для поинтервальных результатов будет сохраняться даже в больших выборках, общий вид их распределений будет достаточно близок, между значениями будет прослеживаться линейная зависимость (Рисунок 63).

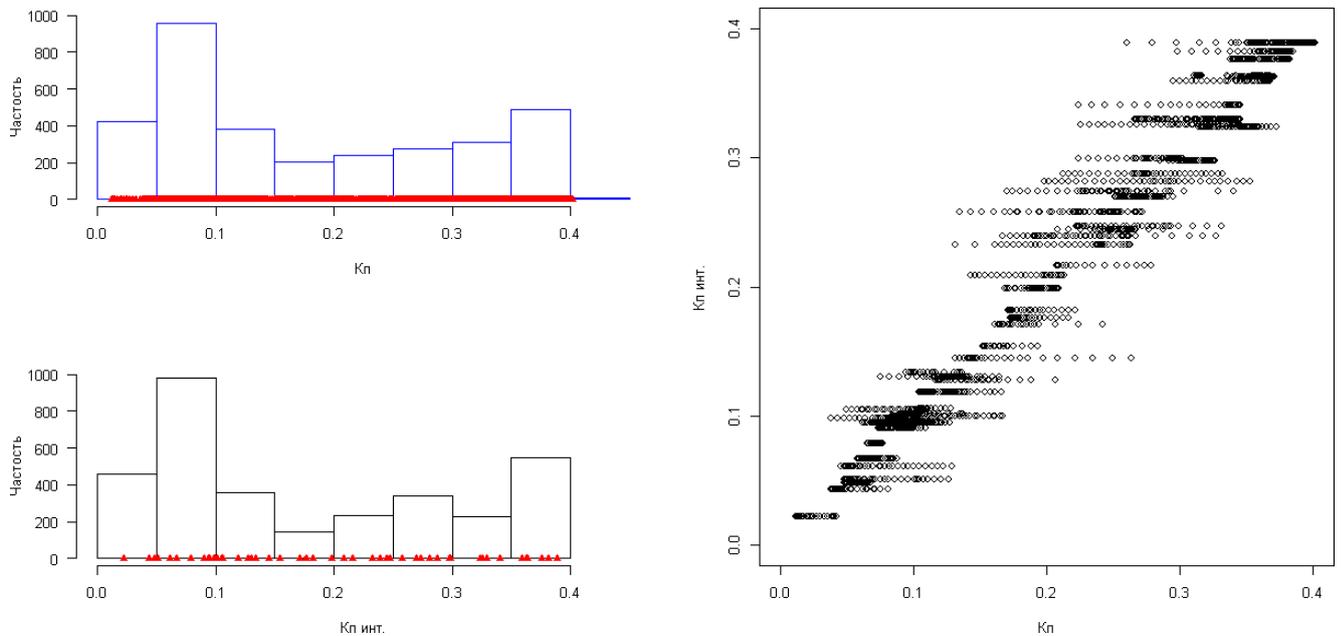


Рисунок 63 – сопоставление гистограмм для результатов в поточечной и поинтервальной форме, и кросс-плот, демонстрирующий характер связи между ними

В то же время, при попытке использования поинтервальных результатов при трёхмерном моделировании одной лишь близости групповых статистик становится недостаточно, не менее важной становится необходимость корректного воспроизведения вертикальной расчленённости разреза, выраженной в локальных статистиках прогнозируемых параметров.

Подавляющее большинство геологических моделей, создаваемых в настоящее время, является трёхмерными. В случае моделирования объектов, имеющих существенно неоднородное строение, общая достоверность модели может в значительной степени зависеть не только от корректности применяемого структурного каркаса, но и от достоверности воспроизведения внутренней изменчивости моделируемых толщ. В частности, такая проблема возникает при геологическом моделировании объектов ПХГ в водоносном пласте, для многих из которых характерно неоднородное тонкослоистое строение пласта-коллектора, зачастую осложнённое предполагаемыми внутренними размывами и малоамплитудными разрывными нарушениями. Если вопрос выбора оптимального алгоритма межскважинной интерполяции до сих пор являются дискуссионным, то характер изменчивости свойств по скважинам зависит в первую очередь лишь от скважинных данных.

С точки зрения локальных статистик, поинтервальный прогноз представляет строение объекта в существенно искажённой форме: вся тонкая структура заменяется внутри каждого интервала неизменным средним значением, в то же время переходы между интервалами, наоборот, представляются неоправданно контрастными. В этом случае, хотя средние значения и сохраняются, изменчивость свойств оказывается существенно искажённой. Тонкослоистое

переслаивание контрастных по свойствам пород подменяется однородным пластом с той же средней пористостью и проницаемостью, а плавные изменения фильтрационно-емкостных свойств – чёткими границами (Рисунок 64).

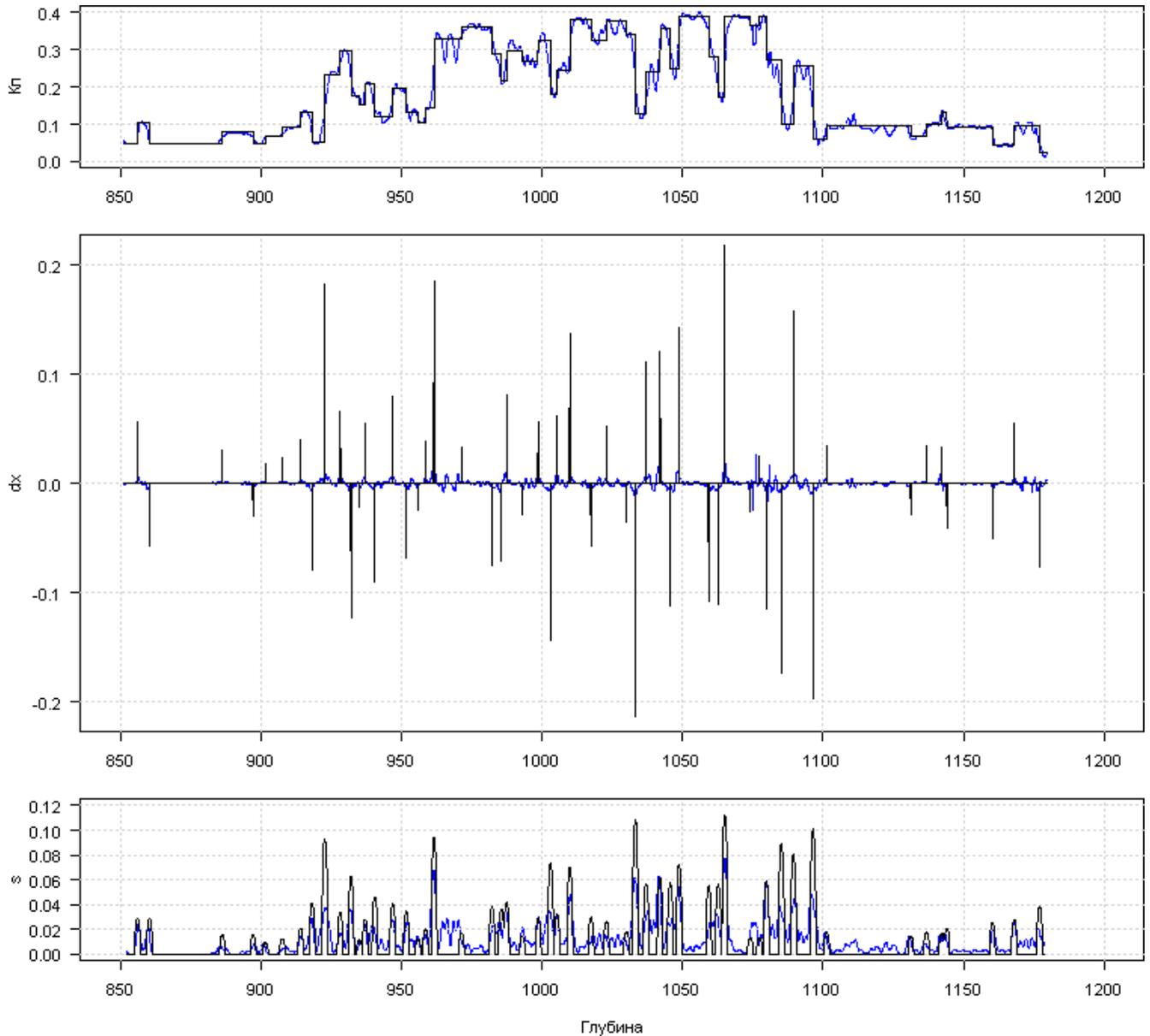


Рисунок 64 – характер искажений изменчивости свойств, возникающей при поинтервальном прогнозе. Сверху – сопоставление кривых поинтервального (чёрный) и поточечного (синий) прогноза, в центре – их кривые моментального приращения значений, внизу – их кривые среднеквадратических отклонений в скользящем окне мощностью 2м (21 дискрет)

В то время как с аномально высокими значениями моментальных приращений значений и среднеквадратических отклонений на переходах между интервалами можно пытаться бороться с помощью различных методов аппроксимации, информация о тонкой структуре изменчивости в любом случае останется безвозвратно потерянной, а имеющиеся искажения при проведении таких процедур лишь возрастут.

Аналогичные искажения данных возникают при переносе скважинных данных на трёхмерную сетку модели (Рисунок 65), однако в данном случае существует возможность осуществлять их контроль, традиционно выполняемый путём сопоставления распределения исходных и преобразованных данных, которые, в случае достаточности выбранной детальности сетки должны быть близки (Рисунок 66).

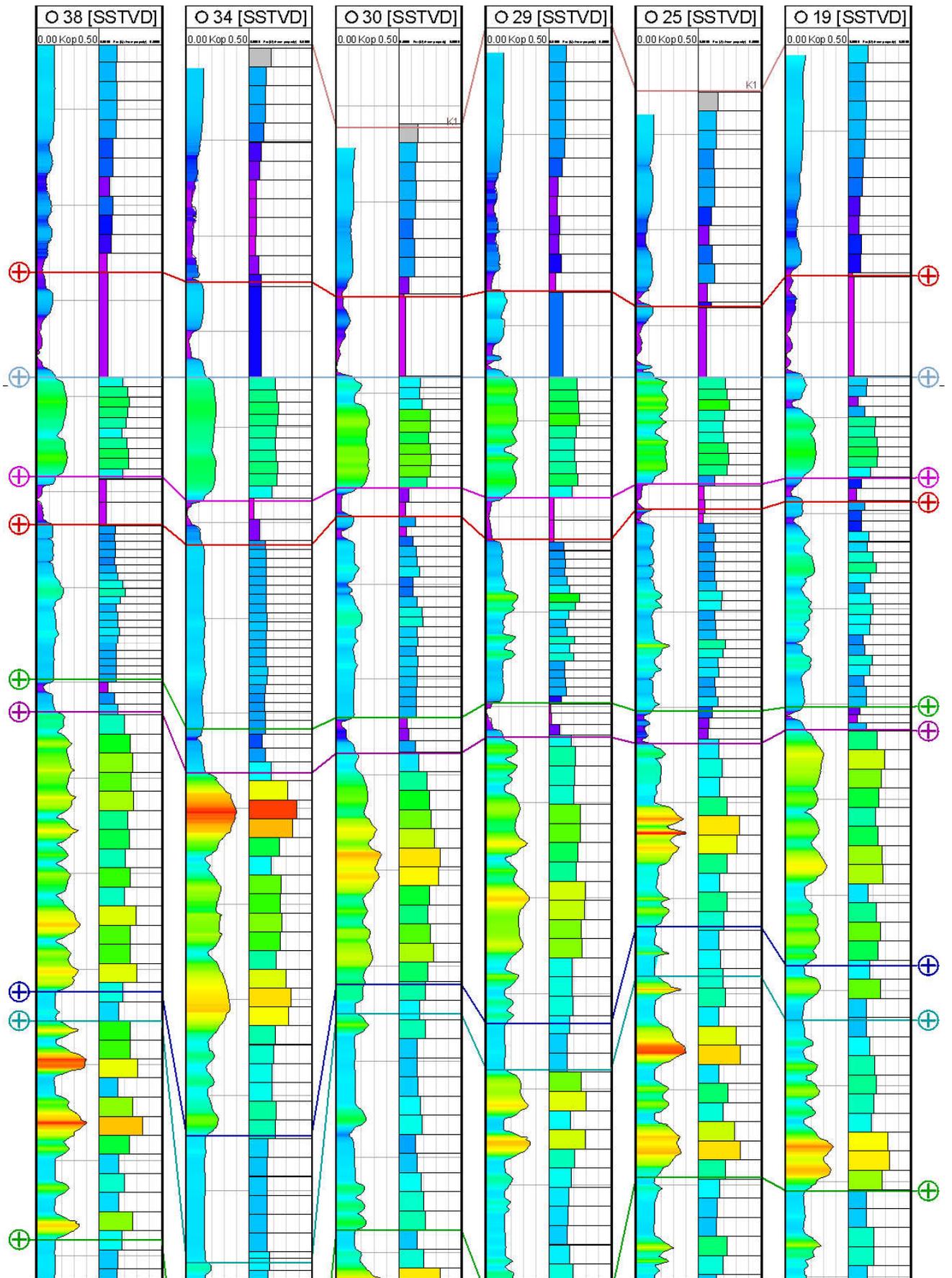


Рисунок 65 – округление данных при переносе скважинных данных на ячейки сетки трёхмерного каркаса геологической модели

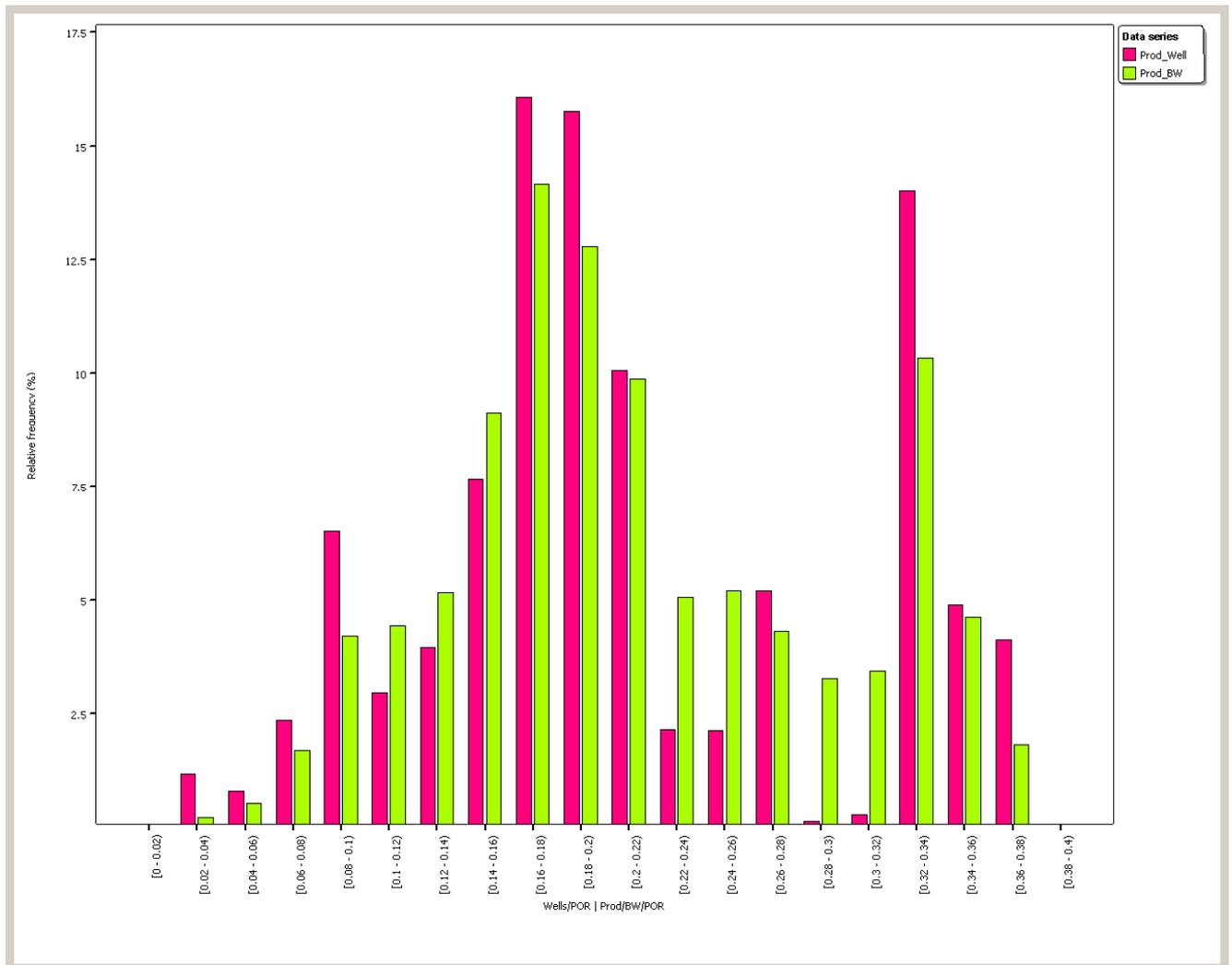


Рисунок 66 – сопоставление гистограмм распределения свойств по скважинам до и после перемасштабирования свойств на ячейки сетки

В случае использования в качестве исходных данных для трёхмерного геологического моделирования поинтервальных результатов, подобная проверка позволит лишь проверить, насколько детальность сетки соответствует детальности уже огрублённых данных. Какая-либо возможность проверить соответствие детальности сетки фактической расчленённости разреза в этом случае отсутствует (Рисунок 67).

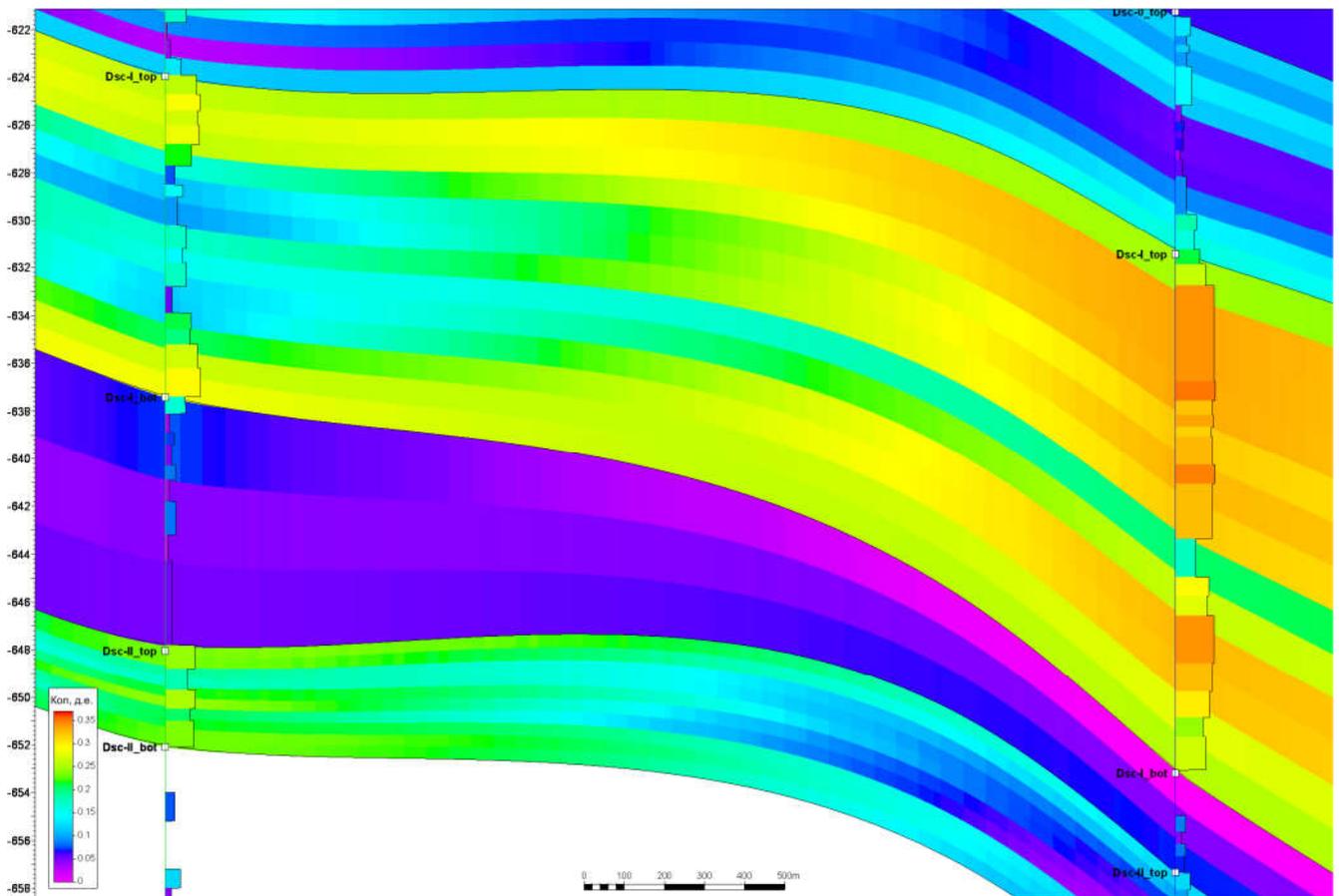


Рисунок 67 – при использовании для трёхмерного геологического моделирования результатов петрофизического прогноза в поинтервальной форме, детальность сетки модели может быть сопоставлена лишь с их детальностью

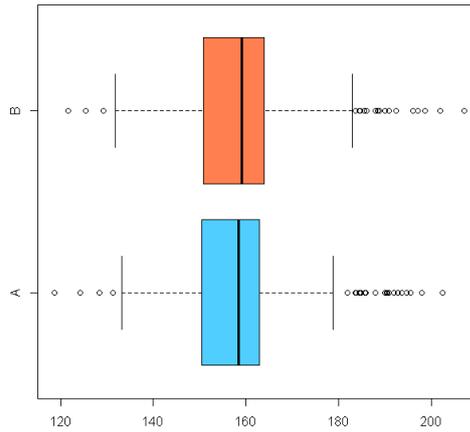
Таким образом, практически для всех применений, начиная ещё с двухмерного моделирования, использование результатов петрофизического прогноза в поинтервальной форме приводит к возникновению дополнительных сложностей и рисков получения некорректных результатов. Они могут быть применимы наравне с поточечными лишь в случае отсутствия необходимости существенного уточнения пластовых отбивок и отсутствии пропусков в прогнозных кривых, и лишь для задач двухмерного моделирования. В случае трёхмерного моделирования число проблем, создаваемых использованием таких данных существенно возрастает. При необходимости текущей или планируемой корректировки отбивок, использование поинтервального прогноза крайне нежелательно, поскольку может привести к существенным искажениям свойств и усложнению процесса моделирования. Существенно затрудняется возможность увязки и совместного анализа поинтервальных данных с другими геолого-геофизическими материалами. Невозможность проверки корректности воспроизведения расчленённости разреза на этапе геологического моделирования создаёт риски снижения достоверности геологического моделирования. В большинстве случаев, единственным способом избежать данных проблем при необходимости выполнения

трёхмерного геологического моделирования при наличии лишь поинтервальных данных, является перестроение петрофизической модели с получением поточечного прогноза фильтрационно-емкостных свойств.

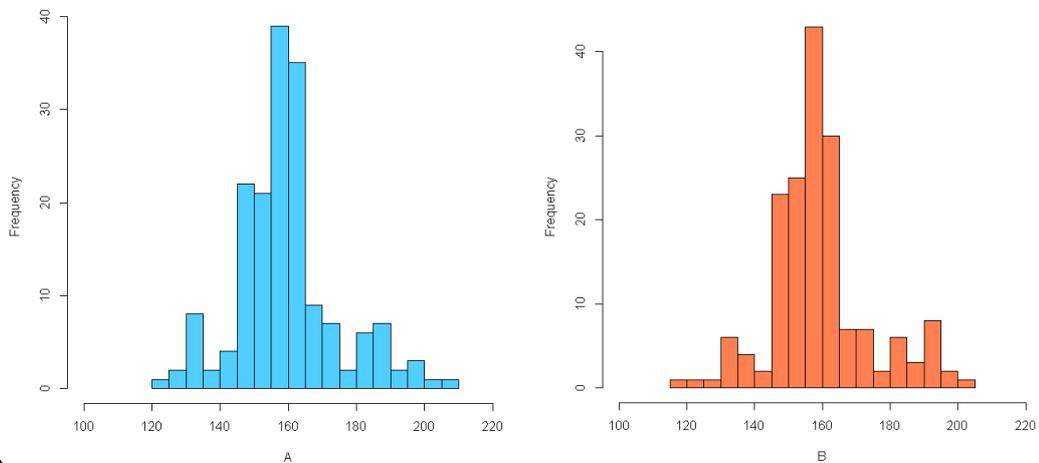
3.4 Методы получения количественных оценок на основе скважинных данных ПХГ и оценки достоверности результатов моделирования

Поскольку результаты геологического моделирования так или иначе могут лежать в основе принятия производственных, экономических, и политических решений, особую роль приобретает вопрос корректности геологических моделей, их адекватности моделируемым объектам. В случае моделирования сложных многофакторных систем, к которым относится и геологическая среда, однозначный прогноз значений параметров невозможен, один и тот же имеющийся набор данных может быть описан принципиально различными моделями, при этом выбор используемых методов моделирования и принятие решений остаётся субъективным. В связи с этим, одним из важных аспектов моделирования является оценка достоверности получаемых моделей. Традиционно, при геологическом моделировании такая оценка носит комплексный характер, сочетающий элементы качественного, количественного и экспертного подходов.

Преимуществом количественной проверки является возможность даже без детального знакомства с моделью удостовериться в соответствии исходных данных и построений, полученных на их основе. Современные программные среды анализа данных и геологического моделирования позволяют практически моментально рассчитывать основные статистические характеристики, такие как среднеарифметическое, медиана, минимум, максимум, дисперсия, и т. п., практически для любых наборов данных – а также строить гистограммы их распределений, дающие визуальное представление о характере распределения оцениваемого параметра. Распространённым способом использования такого инструментария является прямое сопоставление рассчитанных параметров или распределений (Рисунок 68).



а)



б)

Рисунок 68 – способы сопоставления распределений: а – графическое сопоставление статистических характеристик, б – сопоставление гистограмм распределения

При выполнении данной процедуры подразумевается, что близость статистических характеристик или визуальное сходство распределений оцениваемых параметров означает отсутствие между ними систематических расхождений. В этом предположении кроется наибольшая опасность использования данного подхода, поскольку данное положение в общем случае ошибочно. Простота получения различных количественных характеристик с помощью штатных инструментов программных продуктов анализа данных и геологического моделирования лишь усугубляет данную проблему.

При измерении какого-либо геолого-геофизического параметра, получаемые значения, их точность и достоверность непосредственным образом зависят от базы наблюдения, по которой производится его оценивание [68]. Соответственно, сопоставление нескольких количественных оценок некоторого параметра может быть корректным только при условии их получения по равным базам наблюдения либо приведения к сопоставимым базам. В иных случаях, подобные сопоставления хотя технически и возможны, но могут привести к получению существенно

искажённых оценок. Например, поскольку изучаемая (моделируемая) геологическая среда характеризуется неоднородностью распределения свойств, в большинстве случаев среднее значение изучаемого параметра по отдельно взятой скважине или группе скважин не будет соответствовать среднему значению по всему объекту (также как и среднее по данному объекту – не будет соответствовать среднему по всему региону, к которому он относится). Соответственно, в случае корректного геологического моделирования, достоверно воспроизводящего изменчивость свойств, среднее значение по скважине или группе скважин не будет соответствовать среднему значению по модели. Степень сходства распределений будет зависеть в первую очередь от соответствия баз, по которым производился расчёт (Рисунок 69). Это касается не только среднего значения, но и других статистических характеристик: минимального, максимального значений, стандартного отклонения в некоторой области, а также и гистограмм изучаемого параметра.

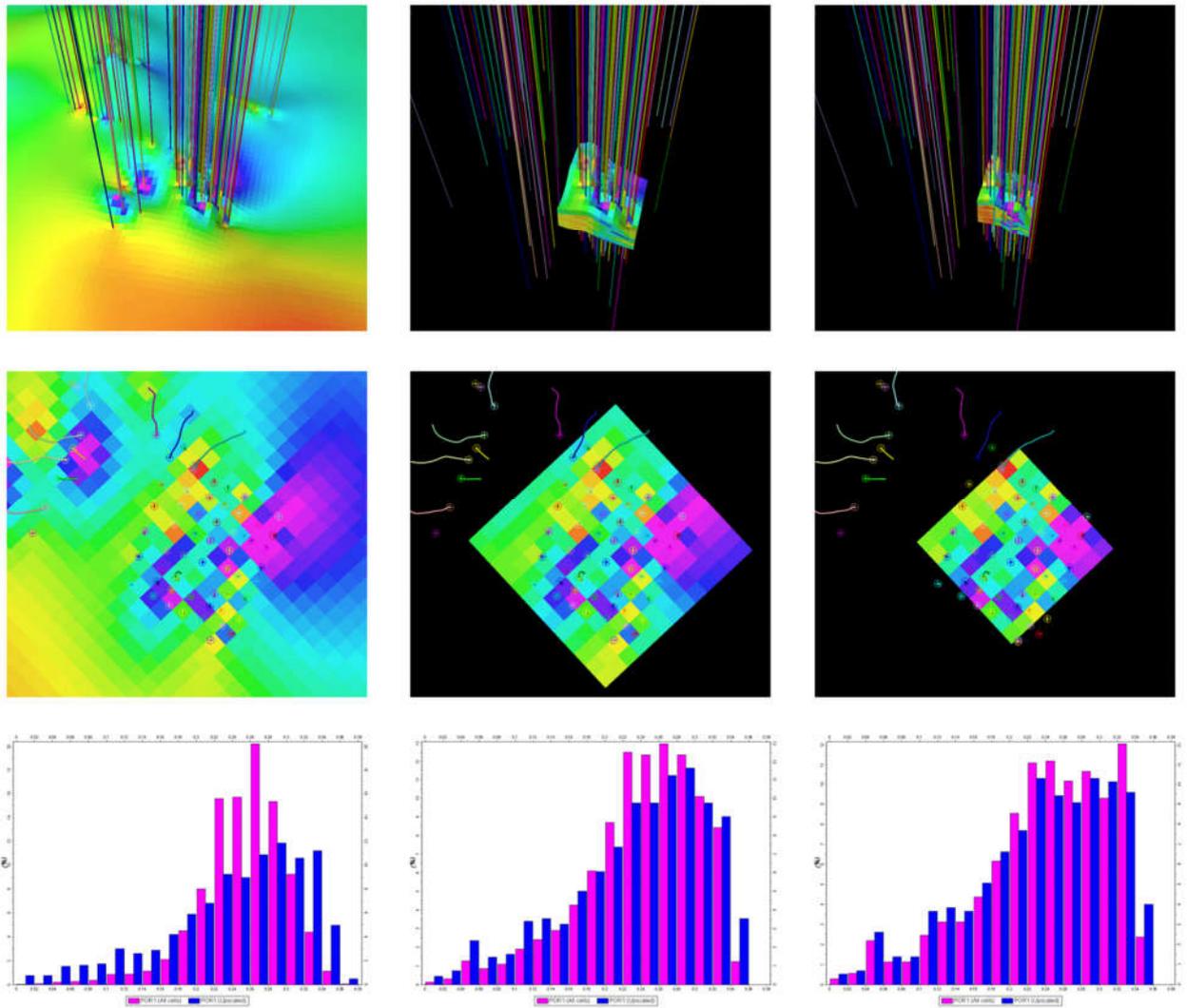


Рисунок 69 – степень сходства гистограмм исходных данных и построенной на их основе модели в зависимости от степени соответствия баз, на которых производилась данная оценка: а – при существенном различии баз, б - при частичном соответствии баз, в – при близком соответствии баз

В случае если базы, по которым рассчитываются статистические характеристики, одинаковы или близки, полученные характеристики при необходимости могут быть корректно сопоставлены между собой. Полученная при этом информации о степени сходства рассчитанных количественных характеристик будет достоверно характеризовать сходство самих объектов. Такая ситуация возникает при контроле качества перемасштабирования скважинных данных на ячеистую сетку модели, когда степень соответствия гистограмм распределения исходных и перемасштабированных скважинных данных позволяет судить о качестве выполнения данной процедуры (Рисунок 65, 66). Поскольку при перемасштабировании свойств на ячейки сетки, значения рассчитываются и присваиваются

только тем ячейкам, для которых были исходные данные, такое сопоставление корректно, поскольку несмотря на то, что перемасштабированные на ячейки сетки данные имеют существенно меньшую детальность чем исходные скважинные данные, базы, по которым производится измерение, совпадают.

Необходимость соблюдения условия равенства баз при сопоставлении статистических распределений на первый взгляд кажется очевидным. В то же время, отсутствие в современных программных продуктах для анализа данных и геологического моделирования каких-либо автоматизированных процедур проверки выполнения данного условия позволяет свободно сравнивать между собой любые статистические распределения, в том числе и полученные даже на существенно отличающихся базах. На практике это зачастую порождает попытки сопоставления количественных оценок, как правило, средних значений или гистограмм, рассчитанных для различающихся баз. Будучи сами по себе правильными, данные оценки, в случае их некорректного сопоставления, могут приводить к получению ошибочных выводов. Поскольку контроль за соблюдением корректности гистограммной проверки возлагается производителями программного обеспечения исключительно на экспертов, производящих анализ, кажущаяся простота и очевидность процедуры гистограммной проверки лишь усугубляет проблему. В большинстве случаев, ошибки, возникающие от игнорирования данного требования, оказываются несущественны и игнорируются либо списываются на некорректность моделирования. При сопоставлении скважинных данных относительно однородно разбуренного объекта и построенной на основе этих данных модели, полученные распределения будут близки, отражая в первую очередь, особенности пространственной изменчивости моделируемого параметра, однако в случае моделирования настолько неоднородно изученного объекта, как ПХГ в водоносном пласте, ситуация принципиально отличается. Именно развитие геологического моделирования ПХГ потребовало чёткого понимания внутренних механизмов традиционно используемых процедур моделирования и их ограничений [31, 35]. В частности, удалось систематизировать знания, связанные с количественной оценкой результатов геологического моделирования [23].

При геологическом моделировании потребность в количественной проверке возникает в трёх случаях: при перемасштабировании скважинных данных на ячейки геологической модели, сопоставлении скважинных данных с результатами моделирования, перемасштабировании ячеек геологической модели на ячейки более грубой гидродинамической модели. Рассмотрим корректность применения гистограммной оценки в каждом из трёх случаев.

3.4.1. Количественная оценка результатов перемасштабирования скважинных данных на ячейки сетки модели

При сопоставлении распределений скважинных данных и ячеек модели, на которые эти скважинные данные были перемасштабированы, оцениваемые ячейки модели характеризуют некоторый минимальный объём вокруг скважины, в котором значение свойств принимается равным зафиксированному в скважине. Поскольку ячейки геологической модели, как правило, характеризуют разрез достаточно равномерно, несоответствие оцениваемых баз и, соответственно, некорректная интерпретация полученных значений может возникать лишь в случае, если оценивается сразу несколько пластов различной мощности и свойств. Для исключения связанных с этим искажений обычно проводят оценку для каждого из пластов в отдельности. В этом случае все имеющиеся расхождения распределений будут в первую очередь связаны с погрешностью, накопленной при переносе скважинных данных на ячейки сетки модели, позволяя использовать гистограммную проверку в качестве средства подбора её вертикального шага, достаточного для воспроизведения вертикальной изменчивости свойств (Рисунок 65, 66). При этом подразумевается, естественно, что данная изменчивость одинакова на всей оцениваемой площади.

3.4.2. Количественная оценка результатов перемасштабирования параметров геологической модели на укрупнённую сетку гидродинамической модели

При оценке качества перемасштабирования итоговой геологической модели, гистограммная оценка может быть корректна лишь в исключительных случаях пропорционального огрубления и равного пространственного охвата исходной и перемасштабированной сеток. В большинстве же реальных случаев сравниваемые исходная и перемасштабированная модели могут иметь как различный пространственный охват, так и различную детальность по глубине и по площади (Рисунок 70). Поскольку гидродинамические модели зачастую имеют существенно неоднородный шаг, одна ячейка гидродинамической модели в одной области может соответствовать одной или нескольким ячейкам геологической модели, в другом – нескольким тысячам таких же ячеек, что не позволяет произвести их непосредственное сопоставление.

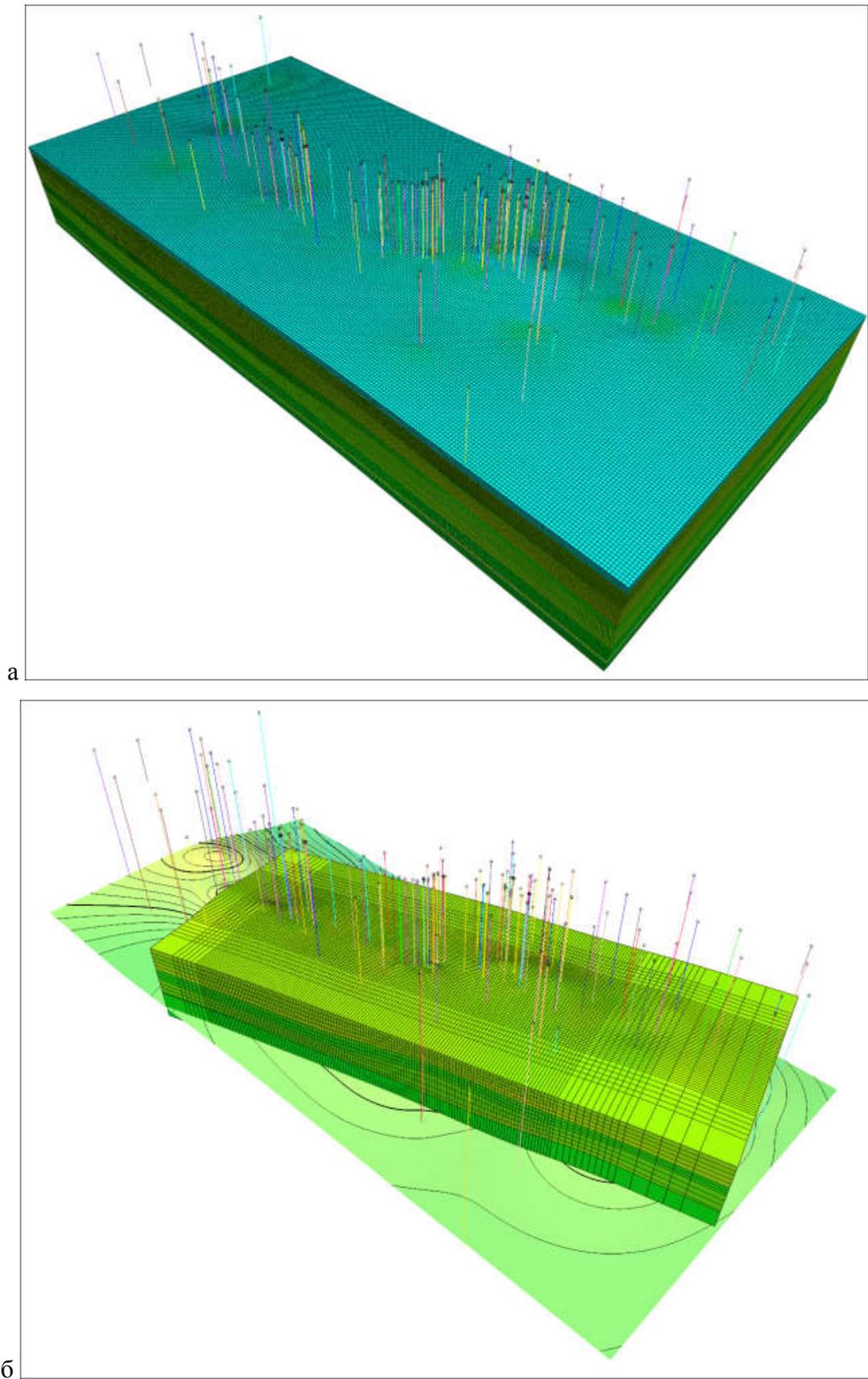


Рисунок 70 – различие общего охвата и объёмов отдельных ячеек геологической (а) и гидродинамической (б) сеток

Существенно более эффективным способом количественной оценки качества моделирования является сопоставление связей пар моделируемых параметров. В отличие от гистограммной проверки, разница размеров ячеек, по которым ведётся их оценка, не влияет на общую форму «облака» связи параметров, меняется лишь плотность точек в отдельных его областях. Таким образом, могут быть корректно сопоставлены сетки с существенно различающимися размерами ячеек, необходимо лишь обеспечить общее соответствие охвата оцениваемых моделей. В случае если «гидродинамическая» сетка соответствует «геологической», общая форма распределений связей их параметров будет совпадать (Рисунок 71). Подобная проверка также может быть эффективна и для оценки качества ремасштабирования скважинных данных на ячейки модели.

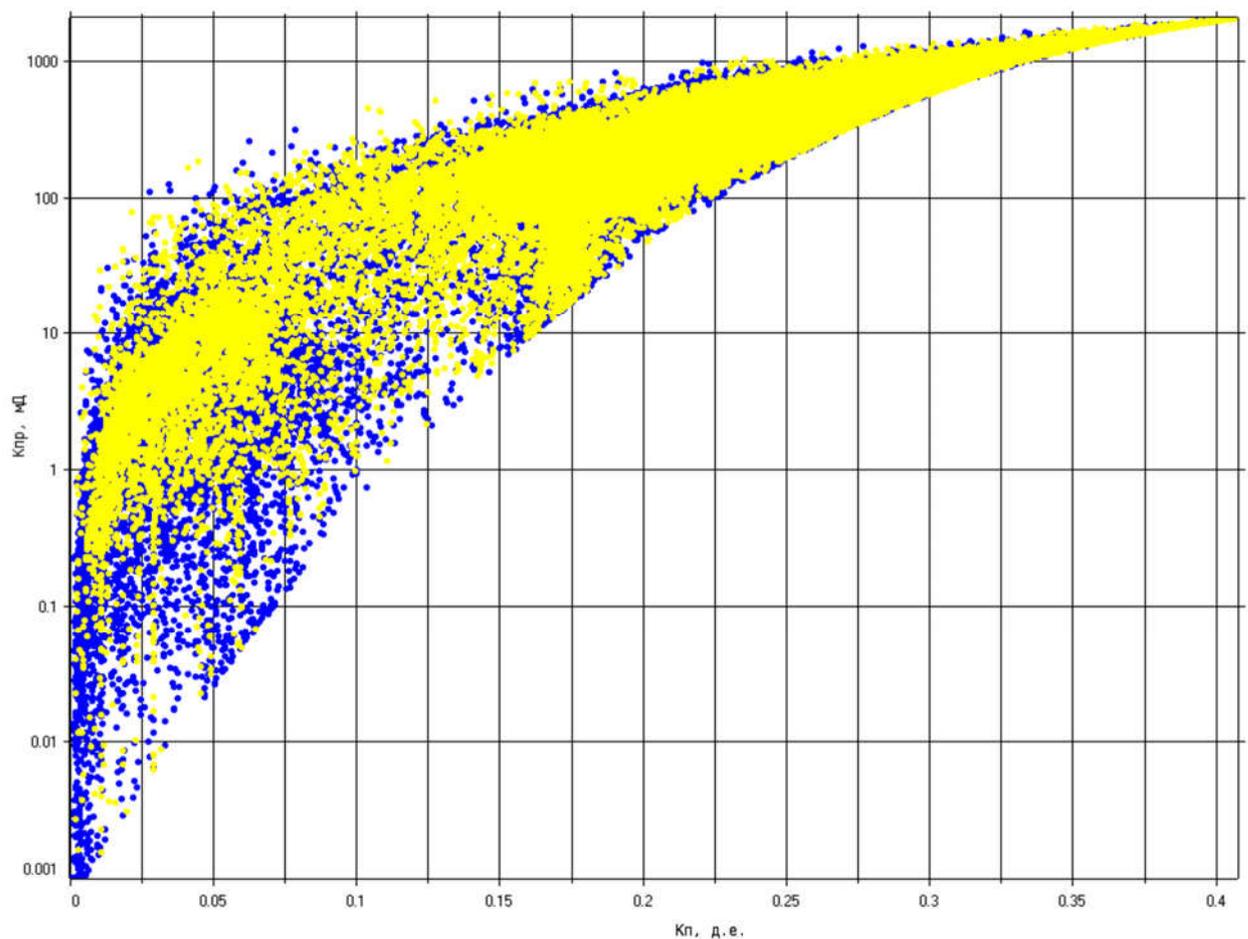


Рисунок 71 – сопоставление структуры связи параметра пористости и проницаемости для геологической сетки (синий) и гидродинамической сетки (жёлтый) для различных моделей

3.4.3. Количественная оценка результатов геологического моделирования по скважинным данным

В случае сопоставления распределений исходных данных и полученных на их основе модели существует два источника некорректности вычисления общего распределения: из-за

неучёта дискретности, фрагментарности наблюдаемых значений и неучёта влияния неоднородности их размещения.

В то время как модель характеризует некоторый непрерывный блок недр, воспроизводя непрерывное распределение изучаемых параметров, исходные данные, даже если они по своему охвату в целом совпадают с построенной на их основе моделью, демонстрируют лишь их отдельные, фрагментарные значения. Помимо своей очевидной пространственной фрагментарности, они будут фрагментарны и по численным значениям изучаемых параметров, демонстрируя заведомо не все значения, характерные для изучаемого объекта, а только некоторые из них. Это не является проблемой непосредственно для процесса построения геологической модели, поскольку многие методы моделирования могут достаточно корректно восстанавливать общее распределение изучаемых параметров на основе фрагментарных и неоднородно расположенных замеров. Но, в то же время, это может сделать невозможной статистическую, и в частности гистограммную проверку полученной модели, даже если предположить идеальный случай абсолютно достоверной модели, точно восстановившей геологическое строение объекта, поскольку её статистические характеристики будут отличаться от гистограммы исходных данных. В значительной степени это обусловлено объективной невозможностью не обладая априорными знаниями об объекте отобрать для его изучения исходные данные, в равной степени представительно характеризующие все градации его свойств. Например, максимальные и минимальные значения параметров могут приходиться на области, для которых отсутствуют исходные данные. Если в задачах, подобных геодезической съёмке, пункты наблюдения выбираются исходя из априорных знаний об изучаемом объекте, то в случае изучения объекта на основе скважинных данных такое априорное знание отсутствует. Дополнительно ситуация может осложняться систематическими ошибками и цензурированностью исходных данных, возникающими на этапе их получения: отбором керна преимущественно из интервалов с улучшенными коллекторскими свойствами, неустойчивостью и разрушением образцов из пропластков с наилучшими свойствами, неоднородностью вскрытия скважинами разреза и т.д. [25]

Проблема учёта неоднородности связана с тем, что имеющиеся скважинные данные, как правило, характеризуют существенно различающиеся объёмы недр. Хотя существуют объекты, характеризующие изучаемый объект достаточно однородно, например, нефтяные месторождения, разбуриваемые регулярной сетью скважин, в большинстве случаев исходные данные обладают той или иной пространственной неоднородностью. Одним из наиболее показательных примеров такой неоднородности является расположение скважин ПХГ в водоносных пластах. В данном случае разница расстояний между ближайшими скважинами

может составлять два-три порядка, а площадей участков, характеризующихся различными скважинами - на 4-6 порядков (Рисунок 39, 72).

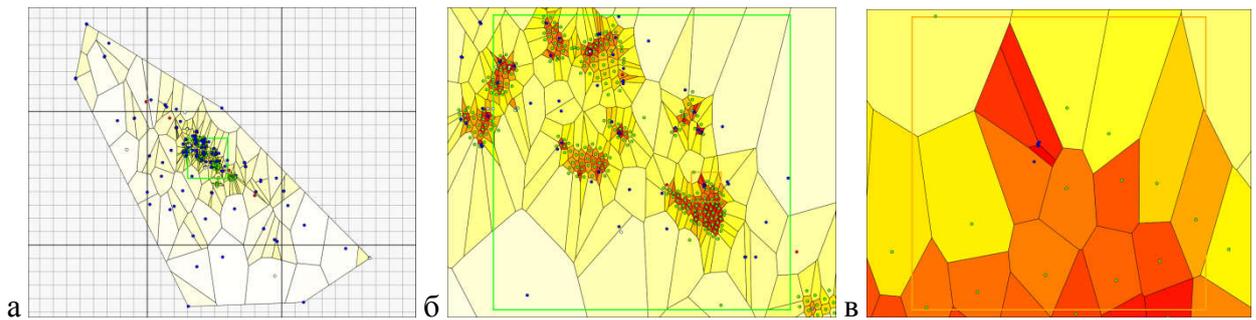


Рисунок 72 – неоднородность охвата участков, характеризующихся неоднородно расположенными замерами, на примере скважин ПХГ в водоносном пласте: а – на уровне объекта, б – на уровне части объекта, в – локальная

Если попытаться оценивать распределение таких данных напрямую, без учёта неоднородности их распределения, полученная гистограмма будет характеризовать распределение данных, но не распределение объекта. Нагляднее всего это можно проиллюстрировать на примере простейшей математической модели: если задать некоторый непрерывно изменяющийся параметр с заранее известным пространственным распределением (Рисунок 73 а), а затем семплировать его значения по сети относительно равномерно расположенных замеров (Рисунок 73 б), гистограмма распределения данного параметра будет относительно однородна (Рисунок 73 в). Если же замеры расположить неоднородно (Рисунок 73 г), наподобие расположения скважин ПХГ, то полученная по ним гистограмма распределения будет иметь явно выраженные максимумы, приходящиеся на наиболее часто встреченные значения параметра (Рисунок 73 д).

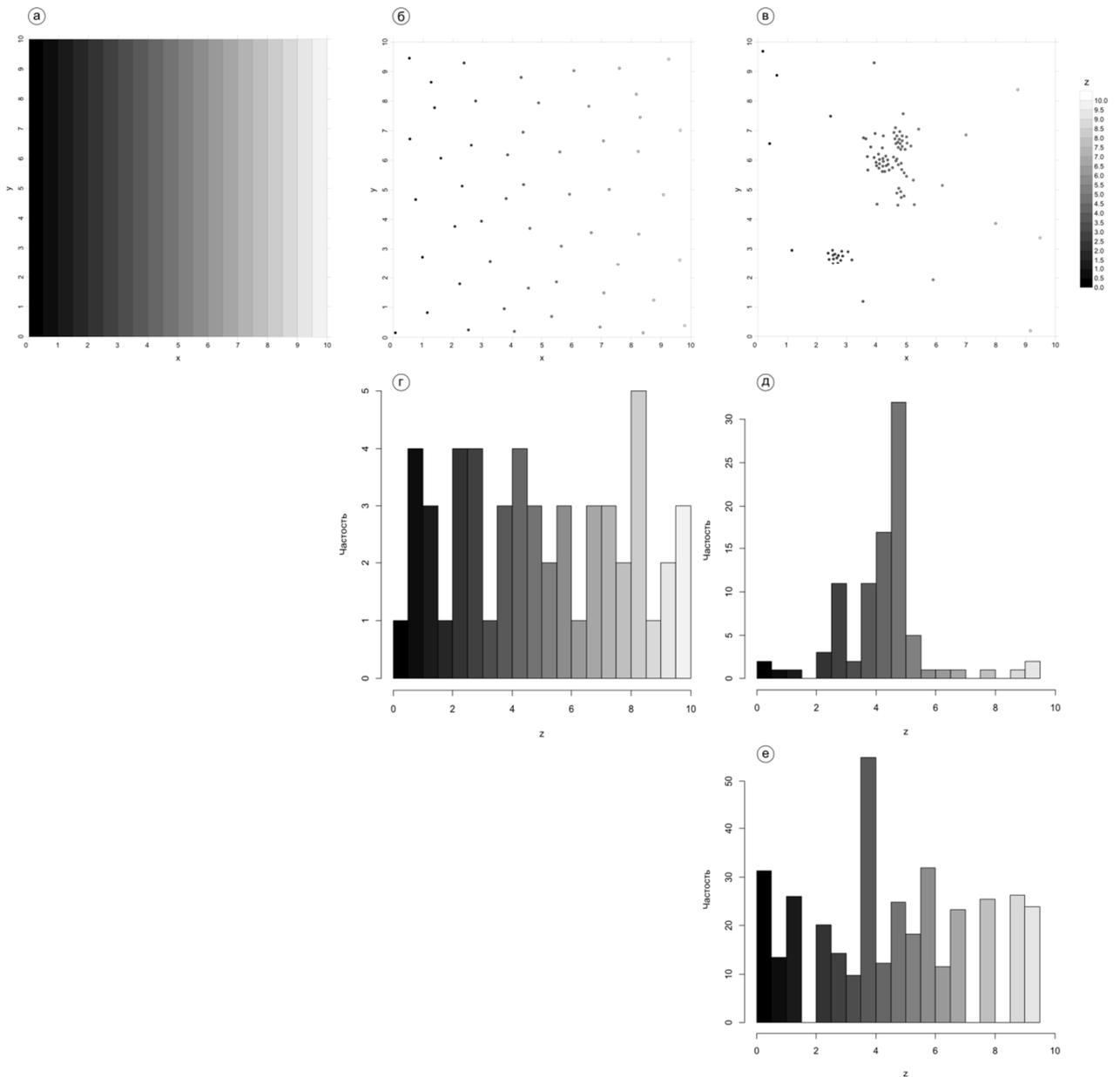


Рисунок 73 – влияние однородности размещения замеров на результаты гистограммной оценки

При расчёте количественных оценок по неоднородно расположенным данным существует возможность снизить влияние неоднородности размещения исходных данных путём присвоения каждому из замеров некоторого весового коэффициента, пропорционального его информационному вкладу, и проведения общей оценки с учётом этих коэффициентов. Данная процедура носит название декластеризации. Применение декластеризации при расчёте количественных оценок позволяет несколько сгладить влияние неоднородности размещения исходных данных (Рисунок 73 в, д, е), однако следует понимать, что существуют различные реализации данной процедуры, которые могут давать существенно отличающиеся результаты. Например, в данном случае, коэффициенты были рассчитаны на основе площадей влияния замеров, полученных методом полигонов Вороного, но существуют и принципиально иные

подходы [85]. Кроме того, следует понимать, что декластеризация позволяет только снизить влияние областей с избытком данных, но не с их недостатком или отсутствием (Рисунок 73 е). При этом данная процедура в том или ином виде реализована ещё не во всех современных пакетах геологического моделирования, кроме того, на современном этапе применяемые алгоритмы позволяют учитывать только площадную неоднородность, полноценная трёхмерная декластеризация в большинстве программных продуктов всё ещё не реализована.

Способы оценки степени неоднородности распределения данных, равно как и сопоставление эффективности различных методов декластеризации требуют отдельного рассмотрения. Но, несмотря на это, очевидно, что если исходные данные существенно неоднородны, без использования декластеризации их статистические характеристики, и, в частности, гистограммы распределений, будут рассчитаны некорректно.

В настоящее время процедура декластеризации появляется во всё большем количестве пакетов геологического моделирования. В то же время, длительное время подобной возможности не было, а в некоторых продуктах её нет до сих пор. Именно этим объясняется всё ещё широкое распространение практики расчёта статистических характеристик исходных данных, и в частности, гистограмм, без учёта кластеризации исходных данных. Кроме того, даже в пакетах, где декластеризация уже реализована, как правило, требуется её включение вручную, что оставляет риск получения некорректных результатов без учёта неоднородности данных. В этом случае сходимость статистических характеристик (гистограмм) данных и модели будет зависеть в первую очередь от того, насколько равномерно данные характеризуют объект (Рисунок 69, 73). Какой-либо практической пользы от подобной оценки в данном случае нет. В то же время, возникает существенный риск некорректного использования полученных результатов.

Хотя действующие нормативные и методические документы [1, 2, 3] не требуют выполнения гистограммной проверки, распространённость метода в популярных пакетах геологического моделирования в некоторых случаях приводит к его использованию для задач оценки корректности моделирования. Поскольку научно-популярные издания рассматривают именно её равномерный случай [43, 42], не давая при этом чётких критериев её применимости, возможные негативные последствия некорректного применения такой проверки остаются завалированными. На практике получаемые расхождения статистических оценок исходных данных и модели зачастую могут трактоваться как общая некорректность моделирования. Это вынуждает специалистов, выполняющих моделирование, добиваться требуемого соответствия, причём даже в случаях, когда «в естественных условиях» по тем или иным причинам его не наблюдалось. Для достижения требуемого сходства в модель могут вноситься намеренные корректировки, либо использоваться специализированные приёмы моделирования.

Наиболее простой способ автоматической подгонки распределения модели под гистограмму распределения данных связан со спецификой работы популярного стохастического алгоритма последовательной гауссовой симуляции. Данный алгоритм в качестве априорных данных среди прочего использует статистическое распределение исходных данных, распространяя его на весь объект (Рисунок 74).

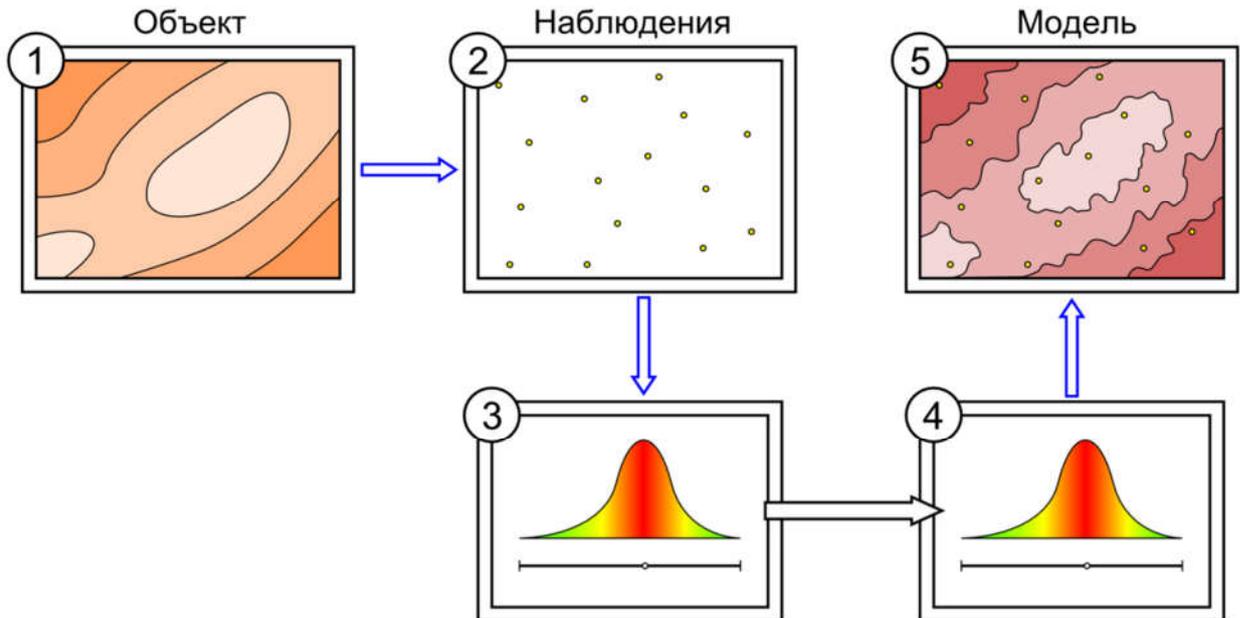


Рисунок 74 – концептуальная модель работы метода последовательной гауссовой симуляции: 1 – объект исследования, 2 – замеры изучаемого параметра, 3 – рассчитанное распределение значений изучаемого параметра, 4 - распределение значений, используемое при последовательной гауссовой симуляции, 5 – полученная модель объекта

Несмотря на некоторую спорность такого подхода, особенно для случаев моделирования объектов, исходные данные по которым недостаточны, чтобы охарактеризовать изменчивость моделируемых параметров, реализующие его алгоритмы в настоящее время встроены в большинство программных продуктов геологического моделирования. Как правило, если пакет моделирования поддерживает декластеризацию при гистограммной оценке, он поддерживает её и внутри процедуры последовательной гауссовой симуляции: в этом случае значимая ошибка, скорее всего, внесена не будет. В любом случае, в силу особенностей работы метода последовательной гауссовой симуляции, каждая из реализаций стохастической модели, построенной данным способом, естественным образом в точности воспроизведёт гистограмму, полученную для исходных данных, независимо от того, корректна она или нет (Рисунок 75).

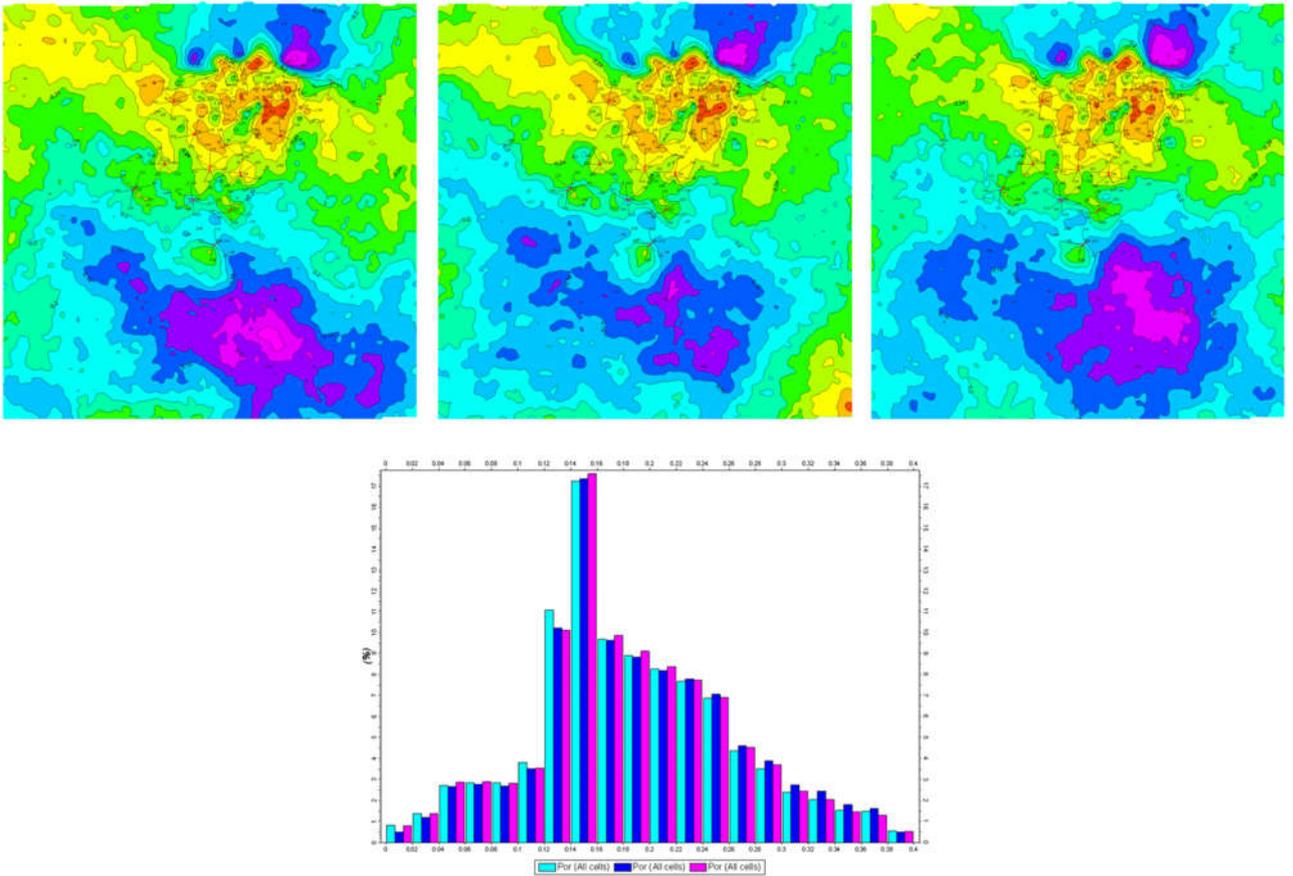


Рисунок 75 – три реализации стохастической модели, построенной методом последовательной гауссовой симуляции, и сопоставление их гистограмм

Именно этой особенностью можно воспользоваться при необходимости подогнать распределение любой модели под распределение исходных данных. За счёт использования процедуры ко-кригинга (co-kriging) существует возможность управлять результатом стохастического моделирования, используя имеющуюся модель как тренд при стохастическом моделировании методом последовательной гауссовой симуляции. В результате данной процедуры, модель, сохранив общие закономерности пространственного распределения свойств, приобретёт статистические характеристики, соответствующие исходным данным [20]. При этом следует отчётливо понимать, что использование подобной процедуры ориентировано не столько на повышение достоверности моделирования, сколько на прохождение формальной проверки. В случае невозможности учёта неоднородности распределения исходных данных данная процедура способна привести к внесению в модель существенной систематической ошибки.

В общем случае, из-за того, что в большинстве реальных ситуаций исходные данные и модель не могут быть сопоставлены напрямую, гистограммная оценка не может быть использована для повышения достоверности моделирования и не является эффективным

средством оценки его корректности. Альтернативные методы, такие как рассмотренная выше оценка связей параметров (Рисунок 71) или более сложные оценки методом сравнения графиков вероятность-вероятность и квантиль-квантиль будут существенно более предсказуемы и корректны. Кроме того, следует понимать, что данные методы требуют привлечения эксперта для итоговой визуальной оценки полученных распределений, что не позволяет в полной мере причислить их к количественным. Вместе с тем, полноценные количественные методы непосредственной оценки достоверности моделирования существуют. В течение многих лет для решения данной задачи широко применяются так называемые методы перекрёстной проверки (ресемплинга), такие как jackknife, bootstrap, cross-validation, exact test [82, 81]. Хотя семейство методов включает несколько различающиеся подходы, общий смысл их работы может быть описан на примере поочерёдного изъятия части исходных данных, построении прогноза без их участия, и оценке полученного отклонения. В результате, все данные участвуют как в исключаемой выборке, так и в проверке, благодаря чему может быть получено распределение ошибки, являющееся мерой достоверности моделирования. В отличие от гистограммного контроля, такой подход действительно позволяет оценить степень соответствия исходных данных и полученной на их основе модели. Он широко применяется при решении научных и прикладных задач моделирования в самых различных предметных областях, хотя в геологическом моделировании всё ещё не нашёл широкого распространения. Хотя данные методы, как наиболее результативные в течение многих лет применяются в отдельных программных продуктах [16, 62, 80] и рассматриваются в специализированной литературе [42], в массовых программных продуктах анализа геолого-геофизических данных и геологического моделирования подобный инструментарий всё ещё отсутствует. Длительное время широкому распространению данного подхода в трёхмерном геологическом моделировании препятствовала его ресурсоёмкость, поскольку при каждой проверке для его работы требуется расчёт не одной, а многих реализаций модели. В то же время, вычислительные мощности ЭВМ в последние годы возросли настолько, что для большинства реальных задач какие-либо реальные технические ограничения для его широкого внедрения в практику геологического моделирования в настоящее время отсутствуют. Хотя вопросы влияния кластеризации и цензурированности исходных данных на достоверность оценок, полученных методами перекрёстной проверки, всё ещё недостаточно проработаны, данный подход из всех предложенных на данный момент представляется наиболее перспективным.

В качестве критерия, отражающего степень кластеризации исходных данных, может использоваться интерквантильный размах площадей полигонов Вороного, построенных с использованием Евклидовой метрики по скважинным данным, ограниченным построенным по ним же выпуклой оболочкой:

$$k_{cl} = IQR(S_N(\text{Conv}(N) \wedge V_p(N)))$$

- где $IQR(A)$ – интерквартильный размах (InterQuartile Range) множества A , $IQR = Q3 - Q1$, где $Q1$ и $Q3$ – это первый и третий квартили соответственно, $\text{Conv}(N)$ – выпуклая оболочка множества точек N , $V_p(N)$ – полигоны Вороного множества точек N , $S_N()$ – площади полигонов, полученные применением указанных операторов для множества точек N .

Действительно, в случае кластеризации исходных данных площади, характеризующие информационный вклад каждой конкретной скважины, отображаемые площадями построенных для каждой из них полигонов Вороного будут различаться тем сильнее, чем большей будет величина имеющейся площадной неоднородности их распределения (Рисунок 72). Необходимость ограничения области построений построенным по анализируемым данным выпуклой оболочкой, вызвана необходимостью исключения вклада краевых эффектов, связанных с тем, что конфигурация моделируемого объекта в большинстве случаев не в полной мере соответствует области моделирования. Удобство использования такого подхода связано с тем, что алгоритм расчёта полигонов Вороного и выпуклой оболочки реализован во многих программных средствах, либо уже используемых, либо доступных для быстрого освоения и дальнейшего совместного использования с используемыми средствами геологического моделирования (например QGIS). Другие возможные способы, например, на основе анализа распределения расстояний между точками замера, требует применения специализированных средств и методик [73] и поэтому в настоящее время представляется менее предпочтительным. Использование интерквартильного размаха получаемых значений, то есть разницы между первым и третьим квартилем выборки, представляется предпочтительным по причине простоты реализации, большей робастности (устойчивости решения) по сравнению с оценкой дисперсии выборки и тем более оценки её размаха, зависящего от единичных нехарактерных для выборки значений. Расчёт интерквартильного размаха реализован в большинстве средств анализа данных и может быть наглядно визуализирован в виде диаграмм размаха (box plot), наподобие приведённых на Рисунке 68а. Если величина полученного таким образом критерия кластеризации данных превышает 2, данные являются сильно кластеризованными и требуют обязательного выполнения декластеризации при расчёте каких-либо статистических характеристик на их основе. Выполнение декластеризации желательно и в остальных случаях, однако при меньших значениях критерия кластеризации возможность отказа от её применения зависит от решения автора, выполняющего моделирование, например, на основе сравнения результатов с её использованием и без её использования.

3.5 Методы моделирования распределения свойств в пространстве

Существенной проблемой геологического моделирования ПХГ является достоверный прогноз пространственного распределения свойств. Многие популярные в настоящее время методы фациального и петрофизического моделирования не приспособлены для работы с существенно неоднородными исходными данными, позволяя с лёгкостью получить существенно некорректный результат моделирования при полностью корректных исходных данных [23, 31].

В общем виде применяемые подходы к геологическому моделированию можно подразделить на детерминированные и стохастические, а также на «геометрические» и статистические. Детерминированный подход предлагает одно, наиболее вероятное решение, в то время как стохастический – набор равновероятных реализаций, ни одной из которых не отдаётся предпочтения. По принципу работы, методы можно условно подразделить на «геометрические», работающие лишь на основе значений исходных данных и их расположения, и «статистические», работающие на основе переноса статистических характеристик исходных данных на итоговую модель. Таким образом, все применяемые методы можно условно представить в виде некоторой матрицы, каждая из ячеек которой будет отражать сочетание данных подходов (Рисунок 76). Такие методы как триангуляция, метод ближайшего соседа, сплайновый, конвергентный, метод минимальной кривизны, полиномиальный являются «геометрическими» детерминированными. Популярным статистическим детерминированным методом интерполяции является метод Криге (кригинг) и его вариации, статистическим стохастическим – метод последовательной гауссовой симуляции. Кроме того, статистическими является и значительная часть методов фациального моделирования.

	Детерминированный подход	Стохастический подход
"Геометрические" методы	Triangulation, Natural neighbor, Spline, Convergent, Minimum curvature, Polynomial	
Статистические методы	Kriging	Sequential gaussian simulation

Рисунок 76 – классификация распространённых методов геологического моделирования

Особенностью методов, относящихся к детерминированному подходу, является разночастотность получаемых моделей (Рисунок 77), заключающаяся в том, что в области более редкого расположения исходных данных теряется высокочастотная составляющая изменчивости свойств. Иногда данная особенность приводится в качестве недостатка детерминированного подхода, хотя на практике она как правило не вызывает каких-либо существенных негативных последствий.

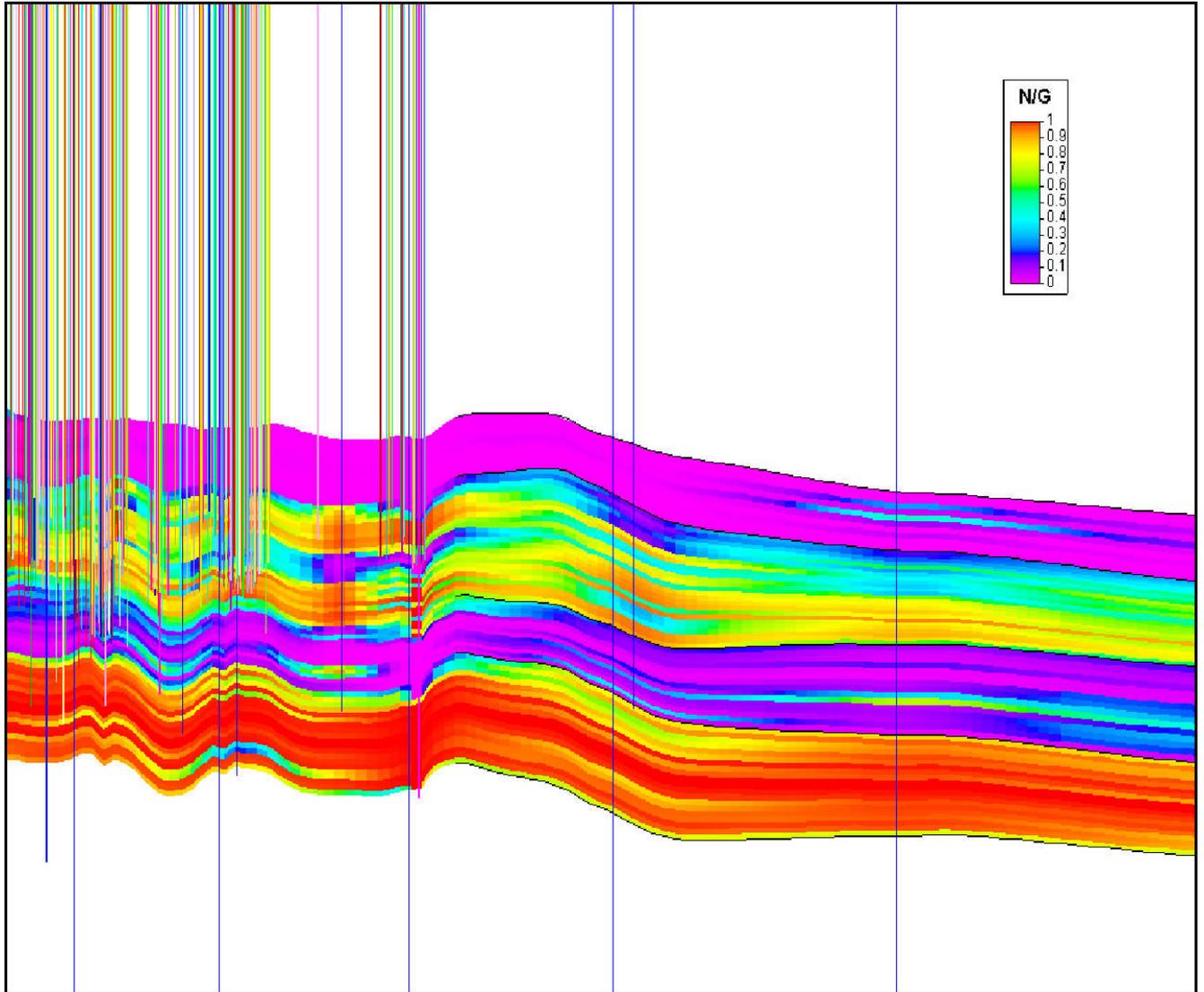


Рисунок 77 – Неоднородность распределения скважинной информации при моделировании распределения свойств терригенного пласта-коллектора ПХГ в водоносном пласте и разночастотность получаемой при этом модели. N/G – коэффициент доли коллекторов

Ограничением статистического подхода является принятие гипотезы стационарности [38, 72], заключающейся в том, что изучаемая величина в волевом порядке начинает рассматриваться как стационарная случайная функция, а все исходные данные – как принадлежащие ей точки.

Важным для понимания является тот момент, что и кригинг, и последовательная гауссова симуляция предполагают, что как вариограмма (зависимость дисперсии от расстояния) одинакова для всего объекта и может быть задана одной функцией. Последовательная гауссова симуляция дополнительно предполагает, что распределение (гистограмма) значений также одинаково для всего объекта и может быть задано одной функцией (Рисунок 78) [36].

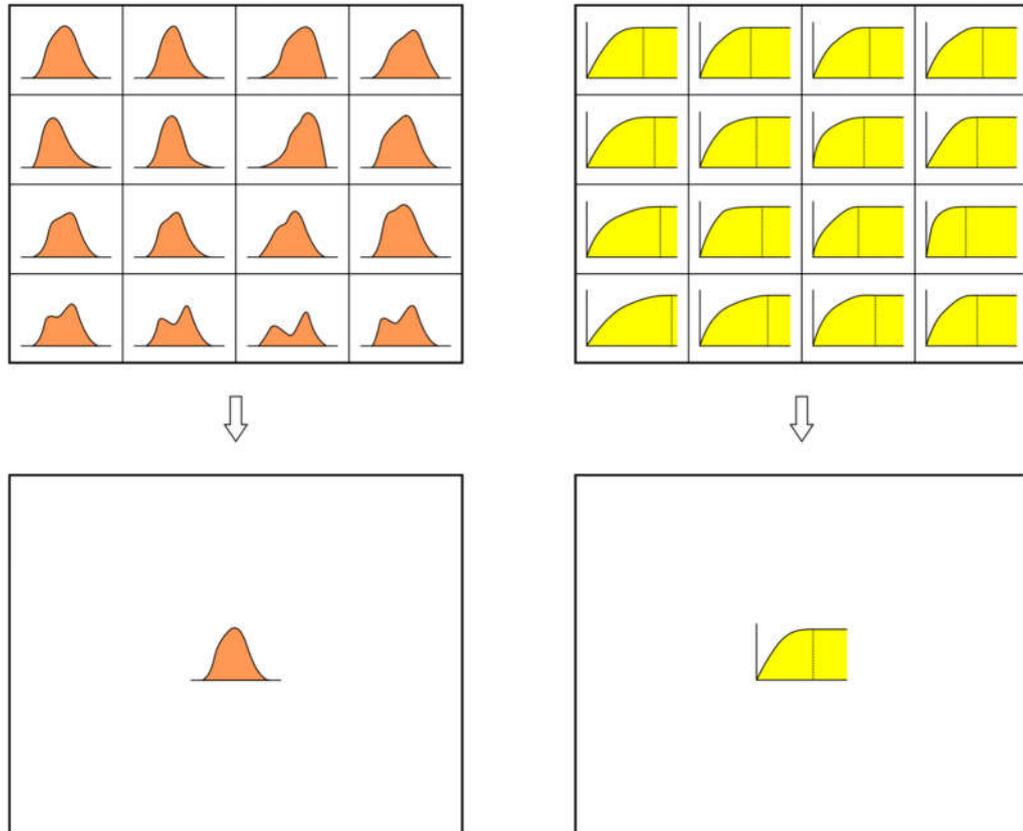


Рисунок 78 – ограничения распространённых методов геологического моделирования с учётом необходимых для их выполнения процедур вычисления модельной вариограммы и гистограммы

Помимо принятия гипотезы стационарности, являющейся наиболее уязвимым местом данных методов, называемых иногда обобщённо «геостатистическими» [74], существует проблема корректного вычисления вариограммы и общего распределения (гистограммы) значений. Именно их корректное вычисление становится основной проблемой при моделировании неоднородно изученных объектов. Основной проблемой в данном случае является учёт неоднородности размещения скважинных данных, вызывающая эффекты кластеризации и цензурированности выборки исходных данных. Кроме того, в случае применения последовательной гауссовой симуляции для моделирования пластов с высокой литологической изменчивостью возможны проблемы приведения фактической гистограммы к нормальному распределению, что необходимо для работы алгоритма [51]. Это может приводить к существенному снижению достоверности получаемых распределений, например появлению

множества областей в областях с отсутствием исходных данных со значениями моделируемых свойств существенно меньшими и существенно бóльшими, прогнозируемых по скважинам.

Как было показано в Главе 3.4., при вычислении гистограммы значений напрямую, получаемый результат во многом будет отражать не столько распределение значений объекта, сколько распределение положения замеров. В этом легко убедиться на модельном примере, сняв значения с заведомо известной функции, например линейной (модель и результаты вычислений приведены в Главе 3.4). В случае однородности расположения замеров их гистограмма будет иметь достаточно однородный характер. В случае же их кластеризации, гистограмма будет иметь локальные максимумы, соответствующие тем значениям, на которые пришлось большее количество замеров. Таким образом, гистограмма перестаёт отображать действительное распределение свойств объекта и её использование при построении модели приведёт к получению существенно искажённого результата. Влияния кластеризации можно значительно снизить, применяя процедуру декластеризации, заключающуюся в присвоении замерам весовых коэффициентов, пропорциональных характеризующей ими площади и дальнейшем вычислении гистограммы с учётом этих весовых коэффициентов. Использование декластеризации позволяет в значительной степени снизить влияние неоднородности размещения исходных данных на получаемое распределение. Некоторой проблемой остаются невозможность полностью устранить это влияние, отсутствие какого-то одного, оптимального, алгоритма расчёта весовых коэффициентов, а также отсутствие автоматизированного включения процедуры декластеризации в пакетах геологического моделирования при неоднородности исходных данных.

К сожалению, какая-либо аналогичная процедура для вариограммного анализа автору неизвестна, хотя при неоднородности исходных данных, и, в особенности, в случаях существенной анизотропии их размещения, получаемые результаты также являются весьма сомнительными, и скорее отражающими особенности размещения скважин, нежели изучаемой изменчивости. Таким образом, в наиболее полной форме классификация распространённых методов геологического моделирования их ограничения и проблемы применения можно представить в следующем виде (Рисунок 79):

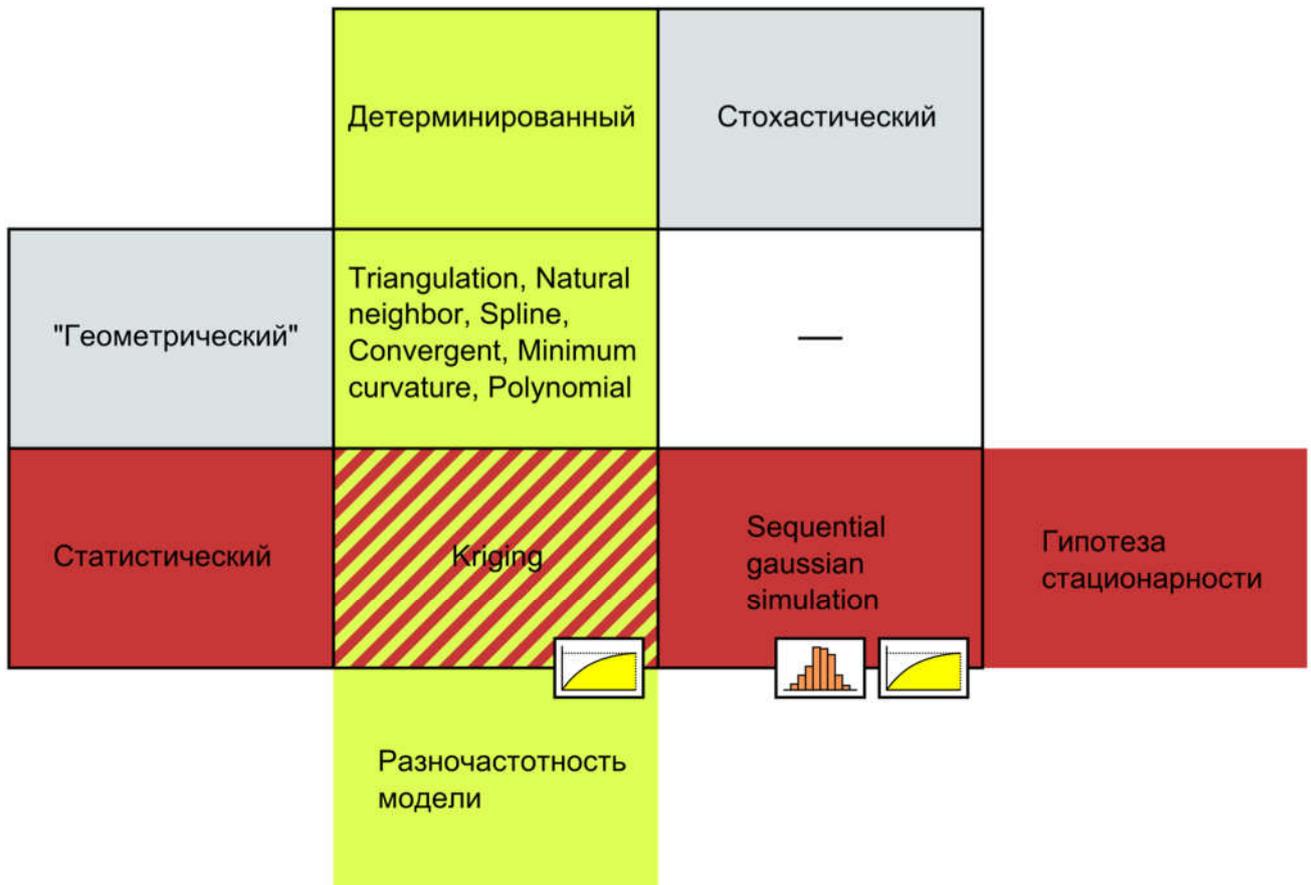


Рисунок 79 – ограничения распространённых методов геологического моделирования с учётом необходимых для их выполнения процедур вычисления модельной вариограммы и гистограммы

Несмотря на наличие приведённых выше проблем, полностью отказываться от методов использующих «геостатистический» подход также не представляется целесообразным. Так, например, кригинг является весьма совершенным интерполятором, единственной проблемой его использования становится лишь невозможность нахождения корректной вариограммы. Однако, поскольку кригинг использует полученное значение лишь как радиус области ограничения для геометрической интерполяции, а в случае отсутствия данных всё равно стремится к значению математического ожидания, вполне корректным представляется использование изотропной вариограммы с радиусом, позволяющим полностью учесть всю имеющуюся в данных изменчивость. Для практических целей, в качестве такого значения может использоваться величина, несколько большая половины наибольшего расстояния между точками проведения замеров (Рисунок 80).

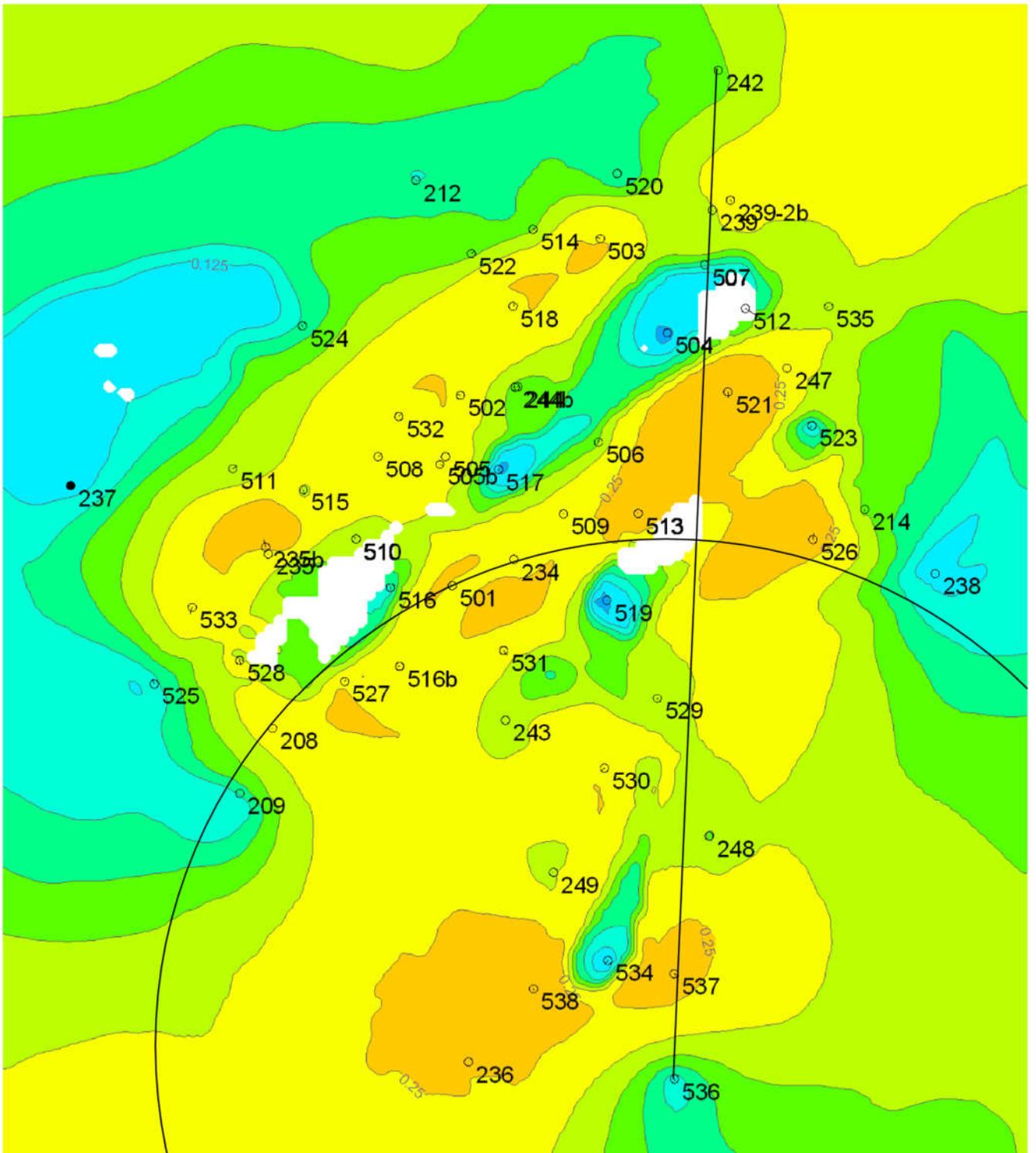


Рисунок 80 – результаты интерполяции свойств методом Кригинга с радиусом вариограммы, равного половине наибольшего расстояния между точками проведения замеров

Подбор параметров модельной вариограммы исходя из карты вариограммы или использования различных поисковых окон может выдавать параметры, приводящие к получению некорректного распределения свойств, например, распространения закономерностей центральной части объекта на весь объект. Это бывает особенно заметно в

случаях, когда найденные закономерности изменчивости параметров имеют явную зависимость от конфигурации скважинных данных (Рисунок 81).

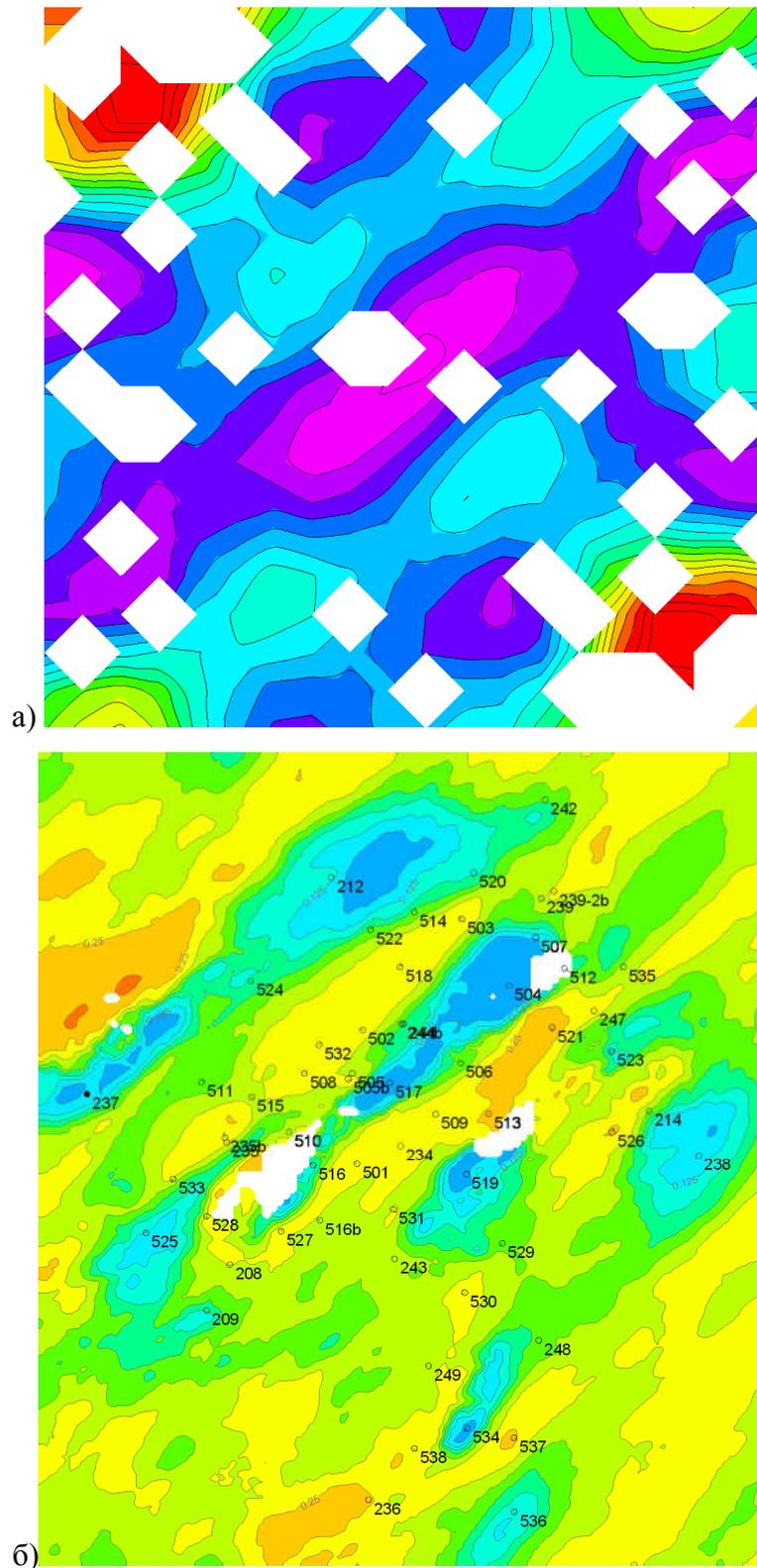


Рисунок 81 – карта вариограммы для результаты интерполяции свойств методом Кригинга с радиусом вариограммы, найденного с её использованием

При использовании последовательной гауссовой симуляции от задаваемого радиуса в значительной степени зависит конфигурация получаемых областей высоких и низких значений, поэтому здесь в случае существенной неоднородности используемый радиус видимо целесообразнее задать экспертным путём. Естественно, для вычисления общего распределения должна быть задействована процедура декластеризации данных. Если выполнить её нет возможности, например, используемый пакет моделирования не предоставляет такой функции, от применения последовательной гауссовой симуляции необходимо отказаться, поскольку её результат будет некорректен.

Традиционная геометрическая интерполяция, как показывает практика, не требует каких-либо дополнительных операций при неоднородности исходных данных. Разночастотность получаемой модели является платой за использование данного подхода, однако стоит помнить, что такая же разночастотность будет присутствовать для любого алгоритма, использующего детерминированный подход, в частности, и для кригинга.

В то же время, в ряде случаев учёт ограничений «геостатистических» методов моделирования позволяет минимизировать их недостатки, позволяя, детерминированных моделей, получать корректные стохастические модели объектов (Рисунок 82).

В качестве одного из перспективных направлений исследований в области интерполяции свойств является отказ от использования глобальных статистик в пользу локальных статистических и непараметрических методов. Одним из алгоритмов, реализующих такой подход, является предложенный Е.В. Ковалевским [84, 51] алгоритм нечёткой геометрико-статистической интерполяции, в настоящее время реализованный в пакете DV-Geo. Несмотря на ряд выгодных отличий от традиционных «геостатистических» алгоритмах, основанных на использовании глобальных статистик, таких как вариограмма и гистограмма моделируемого параметра, эффективность предлагаемого подхода в случае существенно неоднородных данных, всё ещё нуждается в подтверждении. Другим, принципиально отличающимся подходом, является использование для построения модели методов распознавания. Впервые данный подход был предложен А.Б. Вистелиусом [13] и реализован коллективом А.Г. Черникова [79, 16]. Поскольку в основе данного метода лежит прогнозирование связей между параметрами, а получаемое при этом пространственное распределение является лишь следствием данного прогнозирования, метод имеет высокую устойчивость к пространственной неоднородности распределения исходных данных, в настоящее время данный подход апробирован при геологическом моделировании различных объектов ПХГ, в том числе и ПХГ в водоносном пласте [46, 64]. Более подробно принципы работы данного подхода и возможности его использования для решения ряда смежных задач рассмотрены в главе 4.

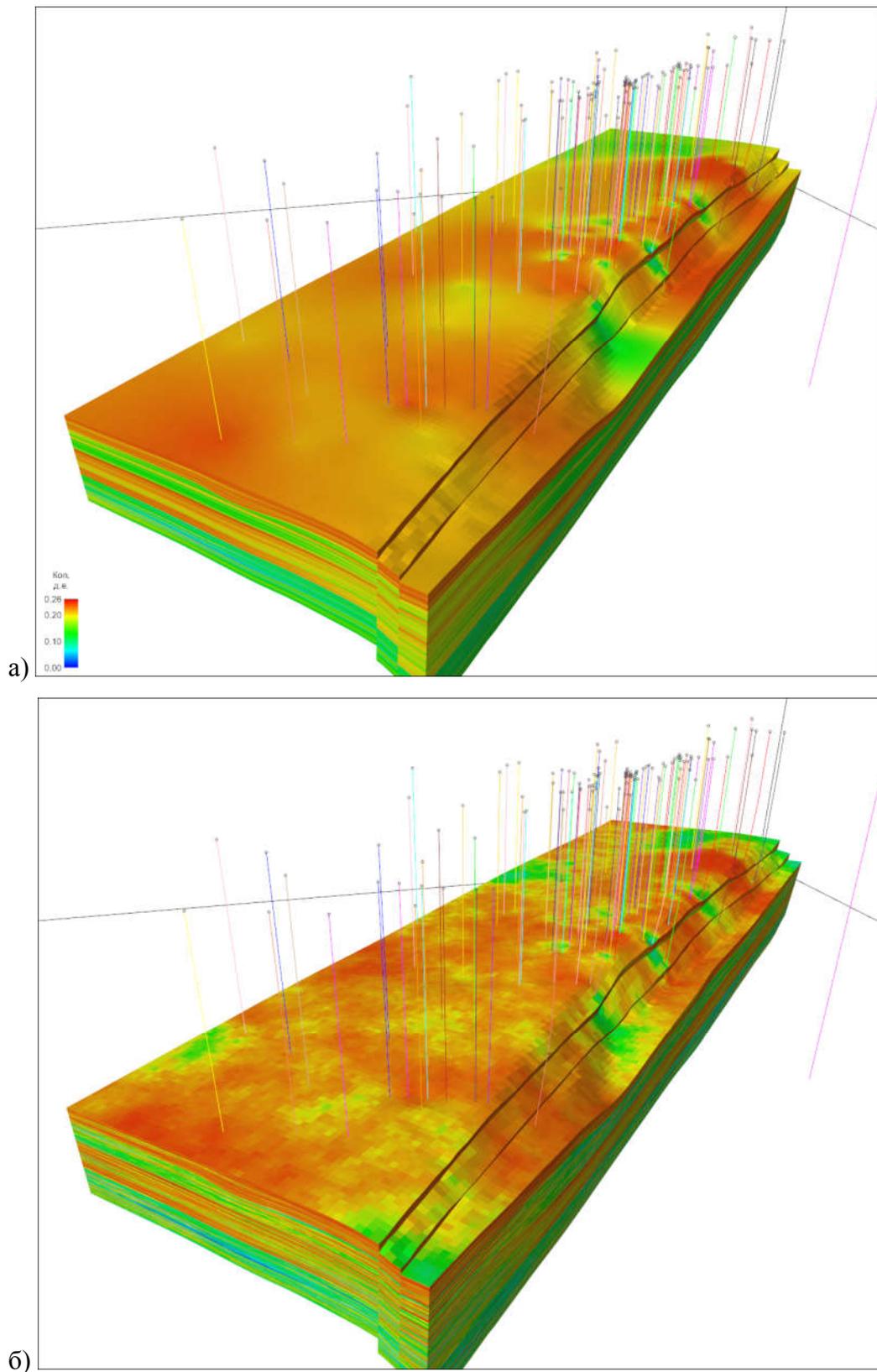


Рисунок 82 – результат корректного использования «геостатистических» алгоритмов при геологическом моделировании неоднородно изученных объектов: а – детерминированный подход (кригинг), б – стохастический подход (последовательная гауссова симуляция, одна из реализаций)

Таким образом, приходится признать, что не все автоматизированные методы моделирования дают корректные результаты при неоднородности исходных данных. Методы, основанные на воспроизведении глобальных статистик, слабо приспособлены для работы с неоднородными исходными данными, хотя отчасти некоторые ограничения можно обойти. В случае использования автоматизированных методов моделирования необходим жёсткий экспертный контроль получаемых результатов. Значительной части проблем можно избежать ещё на этапе планирования геологоразведочных работ, если заранее учитывать специфику дальнейшего использования данных при геологическом моделировании.

3.6 Методы ремасштабирования модели для гидродинамического моделирования

Достаточно остро в случае моделирования ПХГ стоит проблема баланса между ресурсоёмкостью и детальностью модели. В случае моделирования ПХГ к детальности модели зачастую 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 газо-водяным контактом, 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 ремасштабирования геологической модели для экспорта в гидродинамический симулятор нетривиальной задачей, решаемой для каждого ПХГ индивидуально.

Существуют способы реализации неоднородной структуры каркаса модели с использованием более распространённых средств: вложенных локальных сеток, сеток с неравномерным шагом, сконцентрированных в центральной части модели, а также различных комбинаций этих двух способов, однако каждый из них обладает существенными ограничениями. Так, локальные сетки позволяют передать только распределение свойств, но не позволяют хранить пространственную структуру, вписываясь внутрь уже существующих ячеек грубой сетки. Сетки с неравномерным шагом используют значительное количество избыточных ячеек на краях, где подобная детализация 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 решением представляется применение полностью нерегулярных сеток, более детальных в хорошо изученных частях и менее детальных – в краевых, слабоизученных частях, где подобная детальность избыточна (Рисунок 83). Хотя подобные модели в настоящее время поддерживаются многими гидродинамическими симуляторами, инструменты для их создания во многих распространённых продуктах геологического моделирования всё ещё не реализованы. В перспективе же, использование подобного подхода может быть востребовано не только для версии каркаса, экспортируемого для гидродинамических расчётов, но и для основной геологической модели.

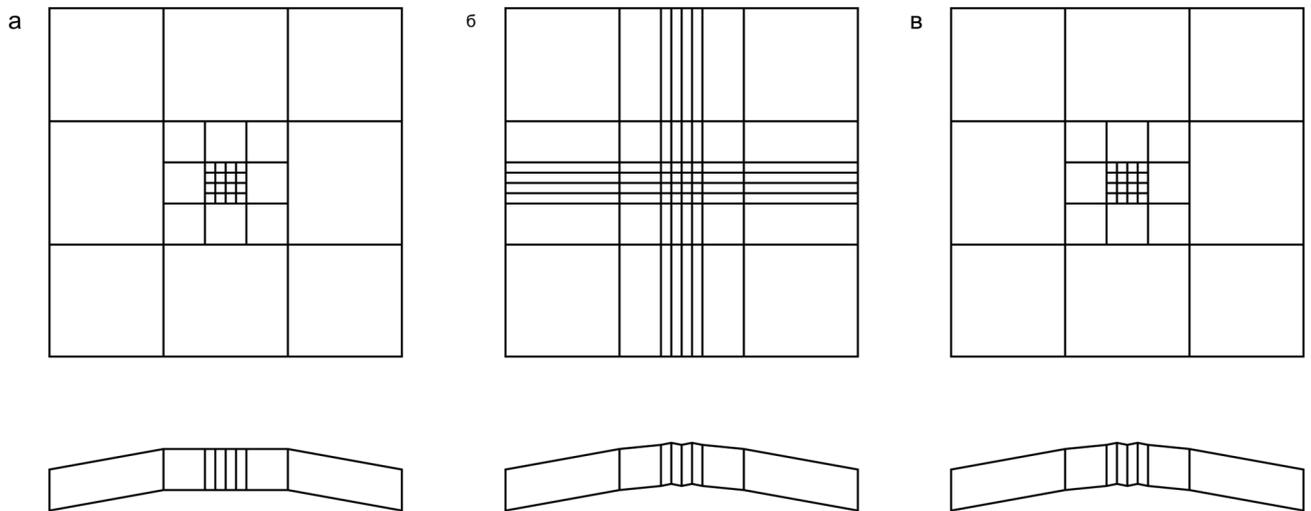


Рисунок 83 – способы реализации неоднородной структуры каркаса трёхмерной модели: на основе вложенных локальных сеток (а), сеток с неравномерным шагом (б), полностью нерегулярных сеток (в). Сверху – в плане, снизу – в поперечном сечении

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 (Рисунок 84). Основным требованием при подготовке такого каркаса является ограничение предельного соотношения длины и ширины ячеек, поскольку достоверность решаемых уравнений фильтрации для существенно удлинённых ячеек может существенно снижаться. Как правило, используется предельное соотношение 1:2 в пределах возможного положения газо-водяного контакта и 1:4 по модели в целом. Поскольку возможности такой оптимизации сетки ограничены, для дополнительной экономии ресурсов такой подход, как правило, применяется совместно с применением неоднородного шага по глубине [22, 29].

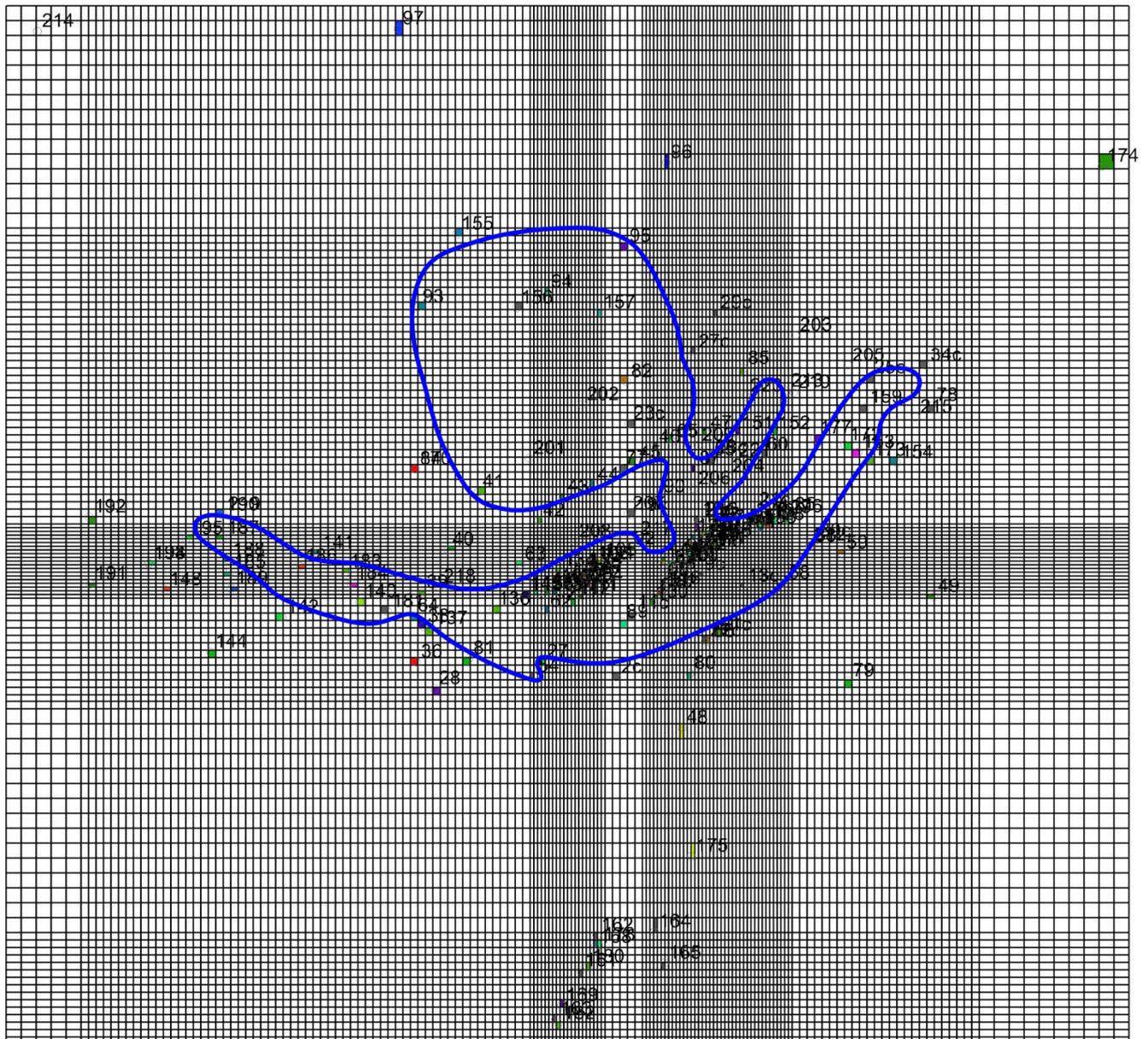


Рисунок 84 – Использование сетки с неравномерным шагом при моделировании ПХГ для уменьшения общего количества ячеек структурного каркаса модели при сохранении его детальности в необходимых областях

Поскольку модели ПХГ зачастую строятся до дневной поверхности, а моделирование межпластовых взаимодействий требует построение единой модели нескольких гидродинамически связанных горизонтов, зачастую геологические модели продуктивной, надпродуктивной, и, иногда, подстилающей толщи бывает целесообразно выполнять в качестве отдельно создаваемых, но совместно визуализируемых сеток. Это позволяет существенно сэкономить вычислительные ресурсы при их построении без каких-либо потерь для дальнейшего удобства их использования. В гидродинамический симулятор передаётся, естественно, только модель продуктивного интервала (Рисунок 85).

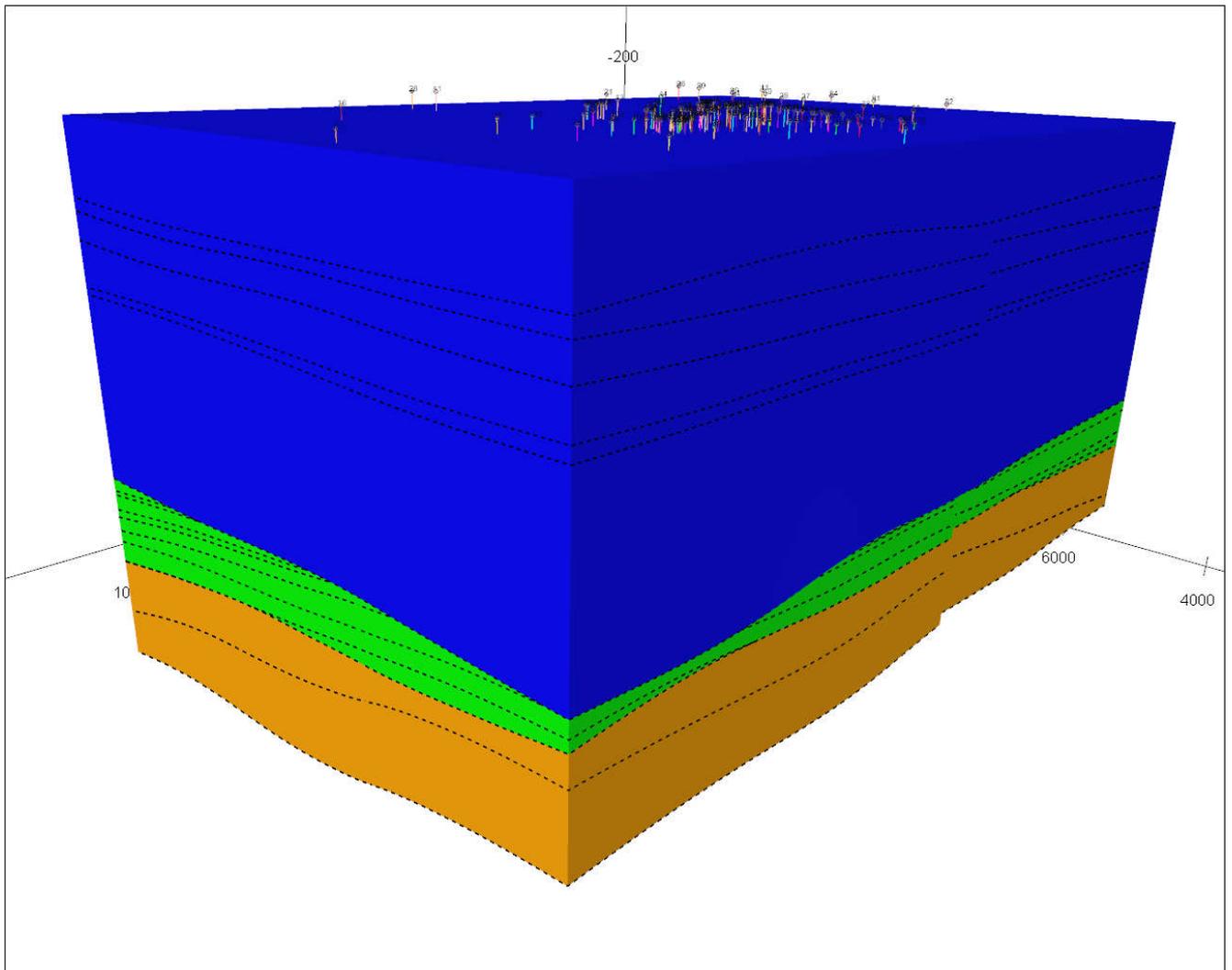


Рисунок 85 – геологическая модель объекта ПХГ, выполненная с использованием трёх отдельных трёхмерных сеток. Зелёный – каркас модели продуктивной толщи, синий – каркас модели надпродуктивных отложений, оранжевый – каркас модели подстилающих отложений

3.7 Методы снижения неопределённости моделирования, использования и уточнения моделей

Одной из существенных проблем моделирования проницаемых резервуаров является согласование между собой их геологической и гидродинамической модели. Как и задача гидродинамического моделирования, задача геологического моделирования, как правило, имеет несколько корректных решений, иногда существенно различающихся. Вполне корректная с точки зрения геолога геологическая модель может быть малоприспособна в качестве основы для дальнейшего гидродинамического расчёта, требуя внесения определённых корректировок.

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 счёт цикличности эксплуатации ПХГ накапливается большой объём таких данных, благодаря чему появляется возможность проверить и уточнить значения геологических параметров, прямая регистрация которых невозможна или проблематична. Выявление главных факторов неопределённости 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 её с учётом этих данных. Как результат, помимо построения корректной гидродинамической модели, также повышается достоверность геологического моделирования [78, 25, 31]. 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 в применении экспертного подхода в моделировании, вероятно, удастся снизить.

3.8 Требования к программному продукту геологического моделирования ПХГ

В обобщённом систематизированном виде рассмотренные выше специфические приёмы моделирования ПХГ могут быть тезисно представлены в виде некоторой таблицы (Таблица 1).

Учитывая, что в настоящее время геологическое моделирование объектов ПХГ ведётся, и в ближайшей перспективе, по всей видимости, будет вестись с использованием программных средств, первоначально разработанных для нефтяных месторождений, не во всех случаях учитывающих рассмотренную выше специфику моделирования ПХГ, представляется целесообразным выработка некоего перечня требований к используемому программному продукту. Поскольку на практике использование того или иного решения зачастую определяется комплексом экономических и политических факторов и не во всех случаях определяется его функциональностью и удобством, использование такого перечня может быть также полезно при формировании технических требований, подготовке миграции с одного продукта на другой и других подобных технологических процессах. В перспективе, данные требования должны быть учтены и при реализации свободной геолого-геофизической программной платформы на принципах СПО. В общем виде, перечень требований может быть условно упорядочен по основным этапам геологического моделирования и представлен в виде некоторой сводной таблицы (Таблица 2). В качестве базовой функциональности, присутствие

которой в пакете геологического моделирования подразумевается, рассматривается общая функциональность любого из ведущих современных пакетов геологического моделирования нефтегазовых объектов, таких как ROXAR RMS, Schlumberger Petrel, ЦГЭ DV-Geo. Часть приведённых в таблице требований носит рекомендательный характер и очевидно, не сможет быть реализована без существенной перестройки архитектуры программного продукта, часть – требует строгого соблюдения.

Таблица 1 – методические приёмы решения основных специфических проблем геологического моделирования ПХГ в водоносных пластах

Причина проблемы	Проблема	Решение
Недоизученность объекта	Различие структурных построений разных авторов	Привязка карт в растровой форме в геоинформационной системе и либо их визуальное сопоставление, либо векторизация, загрузка трёхмерных изолиний в пакет моделирования, восстановление поверхностей и их всесторонне сравнение со скважинными данными и между собой, в том числе - в трёхмерной среде. Из-за отсутствия в современных программных продуктах средств импорта геологических профилей, возможность их непосредственного учёта при геологических построениях в настоящее время отсутствует
Длительность эксплуатации	Ликвидированные скважины не числятся на балансе, нет координат	Привязка растров в геоинформационной системе, снятие координат наиболее вероятных положений ликвидированных скважин
Длительность эксплуатации, недоизученность объекта	Данные ГИС-бурение разнородны, неполны, содержат пропуски, потери, не хватает контекстных данных, необходимых для их интерпретации	Выявление ошибок, склеек и других аномалий в визуальной среде, пакетная нормировка на сводный геолого-геофизический разрез
Длительность эксплуатации, недоизученность объекта	Неточность архивных результатов исследования керна и их недостаточное количество	Привязка к сводному геолого-геофизическому разрезу, а не отдельным скважинам
Длительность эксплуатации, недоизученность объекта	Многовариантные отбивки, ошибки в отбивках	Проверка в визуальной среде, составление одного, наиболее достоверного набора, использование при корреляции "виртуальной" скважины, содержащей сводный геолого-геофизический разрез
Пространственная неоднородность скважинных данных	Навигация по неоднородно разбуренной модели	Интерактивное задание профилей, автоматическое построение разрезов и схем корреляции по скважинам заданной области (как в DV-Geo)
Пространственная неоднородность скважинных данных	Межскважинная корреляция на основе неоднородных по глубине скважинных данных из-за неоднородности вскрытия скважинами разреза	Последовательной выполнение детальной корреляции с первоначальной отбивкой крупных реперов и затем прослеживанием внутренних границ, использование при корреляции "виртуальной" скважины, содержащей сводный геолого-геофизический разрез
Литологические особенности терригенных пластов, используемых в качестве пластов-коллекторов ПХГ	Слишком высокая внутренняя изменчивость для использования результатов сейсморазведки для структурных построений и моделирования распределения свойств	Использование результатов сейсморазведки только для построения границ опорных горизонтов, уверенно прослеживающихся на сейсмических разрезах/кубах
Пространственная неоднородность скважинных данных	Необходимость получения корректных количественных оценок на основе скважинных данных: средних значений, разброса значений, гистограммы распределения и т.п.	Из-за цензурированности выборки исходных данных использование методов гистограммной проверки при сопоставлении скважинных данных и модели нежелательно: они могут работать некорректно. При контроле достоверности моделирования надёжнее использовать сопоставление кросс-плотов. При необходимости получения таких оценок необходимо выполнение декластеризации при расчётах: она снизит влияние неоднородности данных (но не цензурированности). От использования инструментов, не поддерживающих декластеризацию необходимо отказаться
Пространственная неоднородность скважинных данных	Моделирование распределения свойств, литолого-фациальное моделирование	Из-за цензурированности выборки исходных данных использование методов основанных на использовании групповых статистик нежелательно: они могут работать некорректно. Желательно отказаться от использования статистических методов в пользу геометрических. При необходимости использования таких методов необходимо выполнение декластеризации при расчётах: она снизит влияние неоднородности данных (но не цензурированности). От использования инструментов, не поддерживающих декластеризацию необходимо отказаться
Литологические особенности терригенных пластов, используемых в качестве пластов-коллекторов ПХГ, знакопеременные нагрузки на скважинное оборудование	Возможная негерметичность пласта-покрышки и разрывных нарушений, перетоки газа в вышележащие горизонты, в том числе связанные с негерметичностью заколонного пространства.	Построение параметрической модели не может быть ограничено лишь пластом-коллектором. Необходимо моделирование вышележащих отложений, включая отложения с которыми имеется гидродинамическая связь и по которым фиксируются скопления газа в пласте
Особенности использования геологической модели в авторском надзоре эксплуатации ПХГ	Необходимость параметрического моделирования не только объекта эксплуатации, но и вышележащих отложений для использования модели в работах по анализу герметичности ПХГ	Чтобы избежать излишней ресурсоёмкости моделирования, могут отдельно моделироваться объект эксплуатации и гидродинамически связанные с ним отложения, надпродуктивная толща, и, при необходимости, подстилающие отложения, и при необходимости лишь совместно визуализироваться

Таблица 2 – Основные специфические требования к программному продукту геологического моделирования ПХГ

Этап	Требование	Статус требования	Область применения
Загрузка и хранение данных	Хранение разновременных одноимённых методов ГИС	пожелание	общее
	Хранение и сопоставление нескольких наборов отбивок	пожелание	общее
	Пространственная привязка и загрузка в проект вертикальных профилей	пожелание	общее
	Хранение пространственно-временных точечных и интервальных данных	пожелание	специфично для ПХГ
Структурное моделирование	Расчёт карты градиентов (углов наклона) для выявления резких перепадов высот между отбивками	пожелание	общее
	Отбивка пространственно-временных точечных и интервальных данных по данным ГИС	пожелание	специфично для ПХГ
	Интерполяция пространственно-временных точечных данных, например, для построения динамической поверхности ГВК	пожелание	специфично для ПХГ
	Операции над пространственно-временными и пространственными поверхностями	пожелание	специфично для ПХГ
Построение каркаса модели	Возможность задания нескольких сеток, отдельного моделирования свойств по ним и дальнейшей совместной визуализации	требование	общее
	Возможность задания нерегулярной сетки с переменным шагом как по площади, так и по глубине	требование	общее
	Возможность задания полностью нерегулярной сетки, с шагом, зависящим от плотности исходных данных	пожелание	общее
Анализ данных и моделирование распределения свойств	Вычисление и использование при расчётах непараметрических (ранговых) статистик	пожелание	общее
	Поддержка декластеризации при гистограммной оценке распределений свойств	требование	общее
	Поддержка декластеризации при вероятностном моделировании распределения свойств	требование	общее
	Поддержка декластеризации при литолого-фациальном моделировании	требование	общее
	Пространственно-временная интерполяция точечных и интервальных данных, например, для моделирования динамики газонасыщенности по данным ГИС, динамики содержаний химических веществ по данным геохимических исследований и т.п., в том числе с учётом ограничений, накладываемых пространственным распределением коллекторов и непроницаемых разрывных нарушений	пожелание	специфично для ПХГ
	Моделирование динамики ФЕС	пожелание	специфично для ПХГ
	Операции над пространственно-временными и пространственными параметрами	пожелание	специфично для ПХГ
Управление проектом и данными	Сохранение и модификация графа обработки (workflow)	пожелание	общее
	Сохранение версий проекта	пожелание	общее
	Хранение задаваемой пользователем контекстной информации: источник данных, дата, автор, степень достоверности, особенности подготовки данных и т.п.	пожелание	общее
	Для всех типов данных - поддержка операции сдвига и поворота, в том числе групповая, для привлечения результатов работ, выполненных в отличающихся системах прямоугольных координат	пожелание	общее
Визуализация	Средства навигации по неоднородно расположенным скважинным данным: выбор скважин окном заданного размера либо переменного размера, включающим определённое количество скважин	пожелание	специфично для ПХГ
	Интерактивное задание и корректировка линий профилей: задание общего направления, добавление и исключение скважин	пожелание	общее
	Сопоставление скважинных данных и точек пересечения скважинами заданных поверхностей на схеме корреляции	пожелание	общее
	Сопоставление скважинных данных и динамических параметров на схеме корреляции	пожелание	общее

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПХГ

В ходе эксплуатации подземных хранилищ газа накапливается значительный объём геолого-геофизической, геохимической и промысловой информации по объекту. Большой объём промысловых данных позволяет опосредованно, используя гидродинамическую модель, учитывать данную информацию для уточнения геологического строения и распределения свойств пласта-коллектора, пласта-покрышки, контрольных горизонтов и вышележащих отложений. Хотя существует успешный опыт подобных уточнений [25, 7], всегда стоит учитывать, что решение задачи адаптации гидродинамической модели к исходным данным всегда многовариантно. Поскольку достичь приемлемой адаптации модели можно множеством различных комбинаций исходных данных, как варьируя значения недозаданных или недостаточно точно известных параметров, так и внося поправки в результаты геологического моделирования, а также используя различные алгоритмические подходы, различные специалисты, всилу своего опыта, научных взглядов и видения проблемы могут получать различающиеся результаты. Таким образом, требуемая корректировка геологической модели в каких-то случаях может приводить к её уточнению и повышению достоверности, в каких-то – к внесению ошибочных поправок и снижению достоверности. В случае ПХГ с длительной историей эксплуатации, охватывающей периоды, когда регистрация промысловых данных велась с детальностью и достоверностью недостаточной для приемлемой адаптации фильтрационных моделей, временная протяжённость массива исходных данных может лишь осложнять моделирование. Наиболее проблематичными являются ситуации интегральной записи отобранного/закачанного газа, ведущейся не индивидуально по скважинам, а по кустам или газосборным пунктам, а также присваивания небольших значений реально не работавшим скважинам – например, выбывавшим на время проведения капитального ремонта. Такая ситуация не является характерной исключительно для ПХГ, вместе с тем, при существующем уровне развития программно-методических средств она существенно снижает информативность объёма последующих данных, даже если дальнейшая регистрация велась с высокой степенью точности и достоверности. Одним из решений, позволяющих избежать угадывания необходимых корректировок исходных данных, является построение двух моделей: одной общей, на всю историю эксплуатации со средним качеством адаптации, и другую – на актуальный период эксплуатации хранилища, обычно на 10-20 последних лет, с высокой степенью адаптации. В более благоприятных ситуациях, например на объектах, с самого создания которых по всем эксплуатационным скважинам регулярно ведётся регистрация

параметров, накопление массива этих данных действительно может позволить со временем существенно уточнять их геологические модели.

Помимо накопления промысловых данных происходит также накопление значительного объема данных ГИС-контроль, что является особенно информативным для объектов ПХГ, работающих в упруговодонапорном режиме. Хотя по объектам, работающим в газовом режиме, из-за неподвижности контура газо-водяного контакта результаты исследований ГИС-контроль малоинформативны, а на некоторых зарубежных объектах, даже эксплуатируемых в упруговодонапорном режиме, исследования ГИС-контроль могут и вовсе не проводиться, для большинства объектов ПХГ результаты исследований ГИС-контроль представляют собой постоянно увеличивающийся массив данных, относительно достоверно характеризующих пространственное распределение газонасыщенности.

Основным методом, используемым в настоящее время для определения текущей газонасыщенности, является НГК, интерпретация результатов которого позволяет с некоторой степенью точности и достоверности давать количественную оценку коэффициента газонасыщенности пород в прискважинной области. Как правило, такие исследования проводятся в комплексе с термометрией, что в отдельных случаях позволяет отсекаать аномалии, связанные с перетоками газа и создаваемыми ими температурными аномалиями. В настоящее время активно развиваются методы ИННК, потенциально более универсальные и информативные [10], имеется успешный опыт их применения для решения задач мониторинга ПХГ, однако до настоящего времени результаты НГК являются основным используемым методом, регулярно выполняемым по объектам ПХГ. В то же время, хотя результаты традиционного НГК и ИННК имеют отличающиеся условия применимости, точность и достоверность результатов, с точки зрения подходов к использованию получаемых материалов они практически не различаются.

4.1 Комплексирование геологической и геофизической информации на основе геологической модели ПХГ

Традиционный подход к комплексированию геолого-геофизических данных, характеризующих геологическое строение объекта, и данных текущих геофизических исследований подразумевает проведение аналитических работ с использованием предварительно построенной геологической, и в ряде задач, гидродинамической модели.

В отличие от результатов фильтрационного моделирования, данные ГИС-контроль напрямую характеризуют не предполагаемые, а фактические процессы, происходящие в изучаемом блоке недр. В то же время, получаемые данные дают заведомо лишь фрагментарные

оценки газонасыщенности, как в пространстве, так и во времени, как правило, недостаточные для однозначного восстановления пространственно-временного распределения газонасыщенности. При этом пространственное распределение газонасыщенности существенным образом контролируется геологическими факторами: мощностью и средними значениями и пространственной изменчивостью ФЕС пласта-коллектора, его расчленённостью и сообщаемостью отдельных пропластков и т.п. Традиционно данные параметры учитываются при построении геологической модели. Таким образом, в качестве основы для комплексного геолого-геофизического моделирования могут использоваться результаты геологического моделирования. Поскольку получаемые при этом результаты будут в значительной степени зависеть от корректности используемой геологической модели, важной задачей является обеспечение её корректности, способам достижения которой была посвящена Глава 3 данной работы.

Основным ограничением данного подхода, является итерационный характер общей последовательности моделирования, и, как следствие его трудоёмкость, обилие этапов, требующих экспертной оценки, выбора набора используемых в данном случае методик и внесения ручных правок на различных этапах моделирования, а также сложность контроля его достоверности и возможной неустойчивости получаемого решения. Это связано с тем, что одним из основных средств оценки корректности результатов геологического моделирования в случае моделирования ПХГ является гидродинамическое моделирование, корректность которого, в свою очередь может быть проверена по данным ГИС-контроль. Таким образом, данные ГИС-контроль в случае геолого-геофизического моделирования ПХГ являются и исходными данными для моделирования и опосредованно – данными для оценки корректности моделирования. Данное обстоятельство является одним из основных недостатков данного подхода, особенно если учесть неопределённость интерпретации данных ГИС-контроль и многовариантность способов адаптации гидродинамической модели. Хотя получаемые с использованием подобного подхода результаты могут иметь высокую практическую ценность, использование данных ГИС-контроль приносит дополнительную неопределённость в процесс моделирования, хотя при использовании какого-то принципиально иного подхода могло бы её снижать.

Другой практически неустранимой проблемой данного подхода является неопределённость пространственной вариации газонасыщенности по данным ГИС-контроль, связанная с тем, что используемые данные представляют собой фрагментарные наблюдения, по которым общий характер вариации не может быть однозначно спрогнозирован. При экспертном подходе, например при ручном картопостроении, исследователь может постараться учесть имеющиеся у него представления о распределении газа в пласте, основанные, помимо

профессиональной интуиции и личных представлениях о происходящих в пласте процессах на вполне объективные данные замеров давлений по скважинам и распределения объёмов закачанного и отобранного по ним газа, темпы данных процессов, их длительность, возникшие осложнения и т.п. С другой стороны, при автоматизированных расчётах и картопостроении подобные интуитивные связи не могут быть должным образом формализованы, поэтому в большинстве случаев в полной мере не учитываются. Кроме того, во многих случаях, например, когда речь идёт не о газе в пласте-коллекторе, а о локальных скоплениях газа в контрольных горизонтах, общий характер процесса может быть неочевиден и для самого исследователя, а объём дополнительных данных недостаточен для формирования однозначного представления о изучаемом процессе. Из-за этого на основе одних и тех же данных газонасыщенности общее распределение может быть восстановлено многовариантно (Рисунок 86).

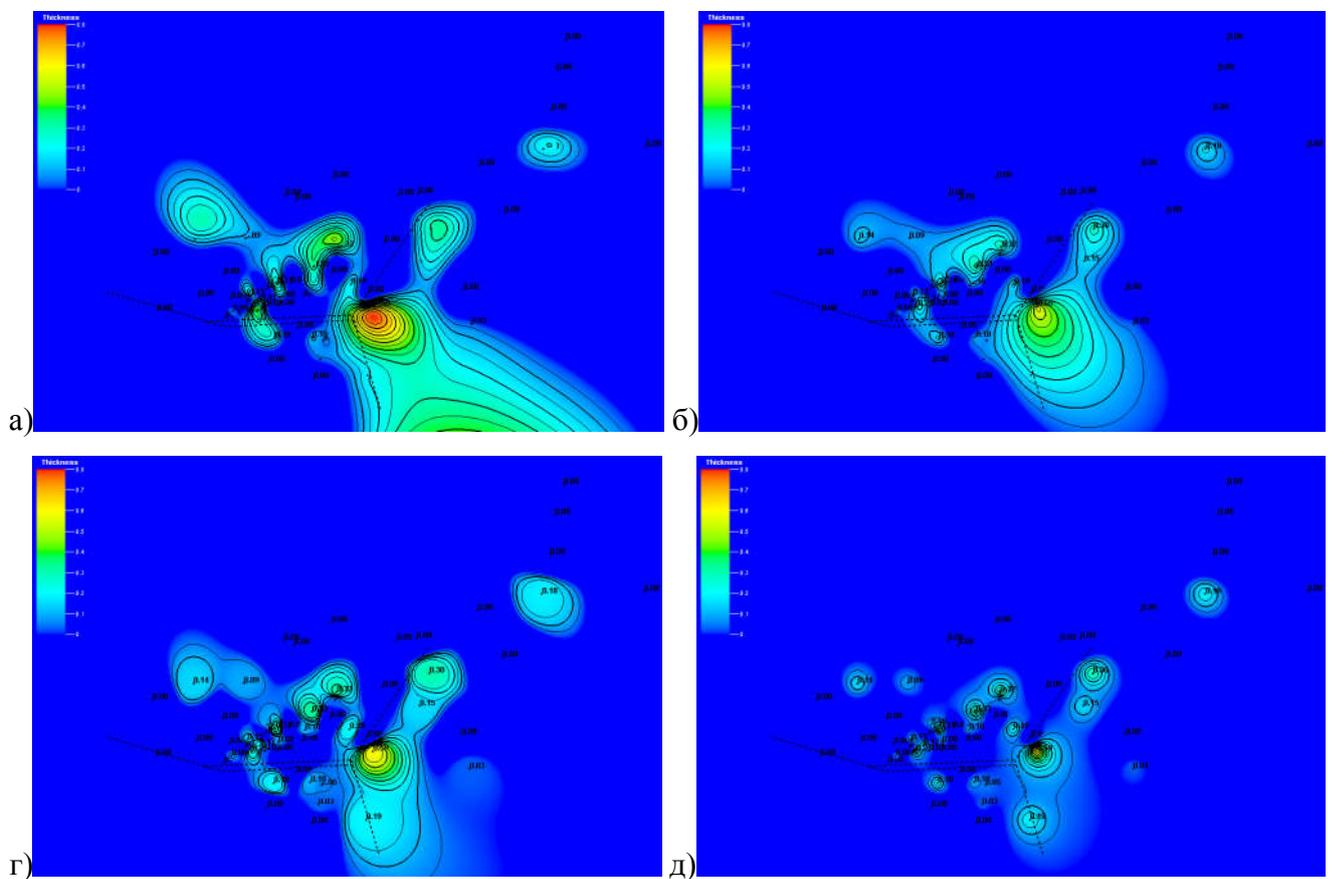


Рисунок 86 – площадное распределение линейных запасов газа в пласте на основе данных ГИС-контроль в зависимости от выбранного метода интерполяции: а – конвергентная интерполяция, б – метод Криге (кригинг), в – метод скользящего среднего (quadrupled), в – метод скользящего среднего (squared)

Хотя данная особенность позволяет вести оценку газонасыщенности в многовариантной форме с расчётом распределения стандартного отклонения и выявления тем самым областей максимальной неопределённости (Рисунок 87). Хотя полученные результаты могут использоваться для выдачи рекомендаций по бурению новых скважин для совершенствования

системы геофизического контроля, полученные результаты не могут быть непосредственно использованы для уточнения геологической или гидродинамической модели.

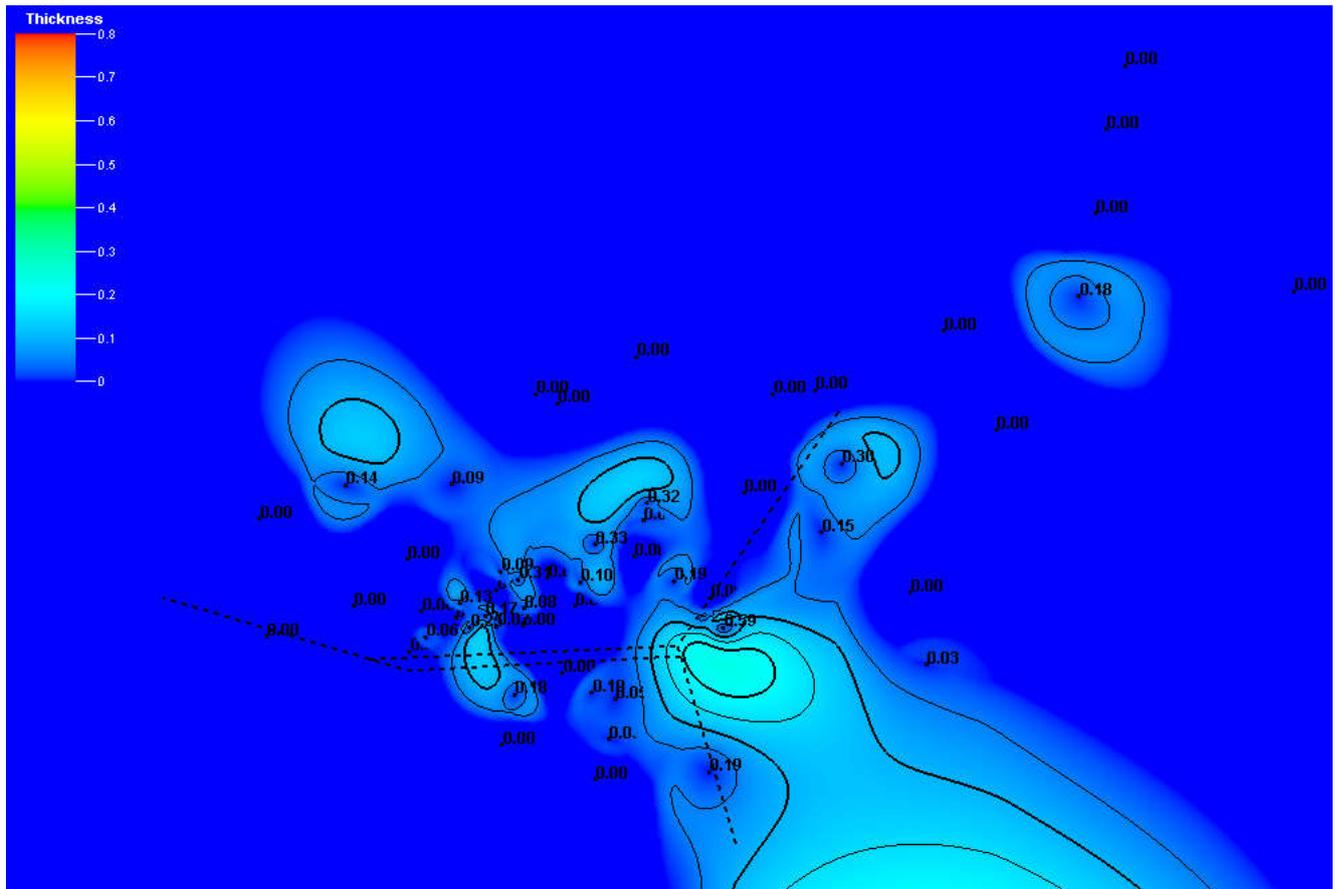


Рисунок 87 – площадное распределение стандартного отклонения линейных запасов газа в пласте на основе результатов расчёта, приведённых на рисунке 86

В отдельных случаях получаемые значения газонасыщенности по данным ГИС-контроль могут использоваться для оценки объёмов газа в пласте, что особенно актуально для получения оценок по контрольным горизонтам, гидродинамические модели по которым традиционно не строятся из-за отсутствия необходимых для этого данных. Эти данные могут использоваться как для выполнения текущей оценки текущих объёмов газа в пласте-коллекторе, так и для контроля герметичности, и, в случае наличия межпластовых перетоков, оценки объёмов газа в контрольных горизонтах. В таком случае значения газонасыщенности по данным ГИС-контроль становятся наиболее достоверным источником для оценки объёмов газа. Но даже если исключить неопределённость связанную с невозможностью отличить по данным каротажа локальное заколонное скопление газа в прискважинной зоне от газонасыщенного интервала пласта, содержащего значимые объёмы газа, интерполяция имеющихся значений газонасыщенности может давать существенно различающиеся результаты. Расчёты, направленные на оценку неопределённости подобных построений показали, что прогнозные объёмы газа в пласте, рассчитываемые на основе получаемых распределений могут различаться

более чем на порядок. Это может быть связано с недостаточностью количества скважин и неудачностью их пространственной конфигурации для получения однозначных построений, различий результатов в зависимости от выбранных методов интерполяции и их настроек, а также способов учёта скважин с нулевыми значениями.

Помимо использования в качестве основы для непосредственного выполнения построений, распределение газонасыщенности по данным ГИС-контроль в некоторых случаях позволяет уточнить фильтрационно-емкостные свойства пласта, поскольку косвенно характеризует их. Данная задача может решаться экспертно, на основе анализа многолетних рядов замеров по отдельным скважинам (Рисунок 88), либо автоматизировано, с использованием статистических параметров, характеризующих средние значения и изменчивость значений газонасыщенности по разрезу и их связь с принятыми ранее значениями фильтрационно-емкостных свойств пород.

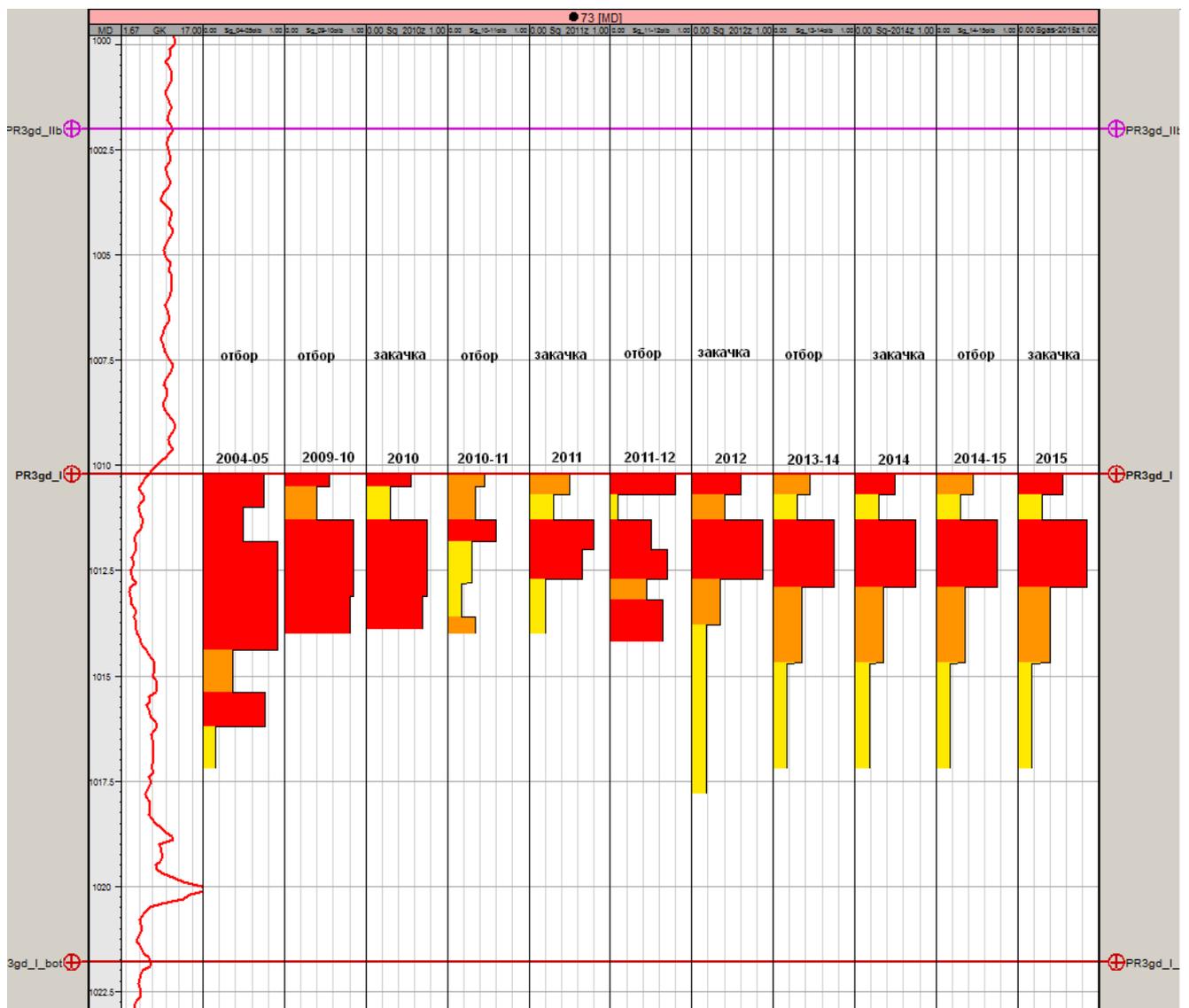


Рисунок 88 – анализ динамики газонасыщенности по данным ГИС-контроль

В качестве программной основы для выполнения рассматриваемых процедур может выступать пакет геологического моделирования, такой как ROXAR RMS, Schlumberger Petrel, ЦГЭ DV-Geo (Рисунки 15, 16, 17, 18, 19, 20, 86, 87, 88) – что наиболее эффективно если необходим анализ вертикальной составляющей распределения свойств либо встроенные средства, реализованные в пакете являются достаточными для выполнения работ.

В случае если задача может быть решена на основе анализа двухмерных распределений параметров и их динамики (Рисунки 19, 29, 86, 87, 89) и анализ трёхмерного распределения свойств не требуется, в качестве основы решения задачи может быть эффективно использована геоинформационная система, такая как QGIS или GRASS GIS, в случае необходимости, дополнительно расширяемая подключаемыми средствами анализа данных, такими как R.

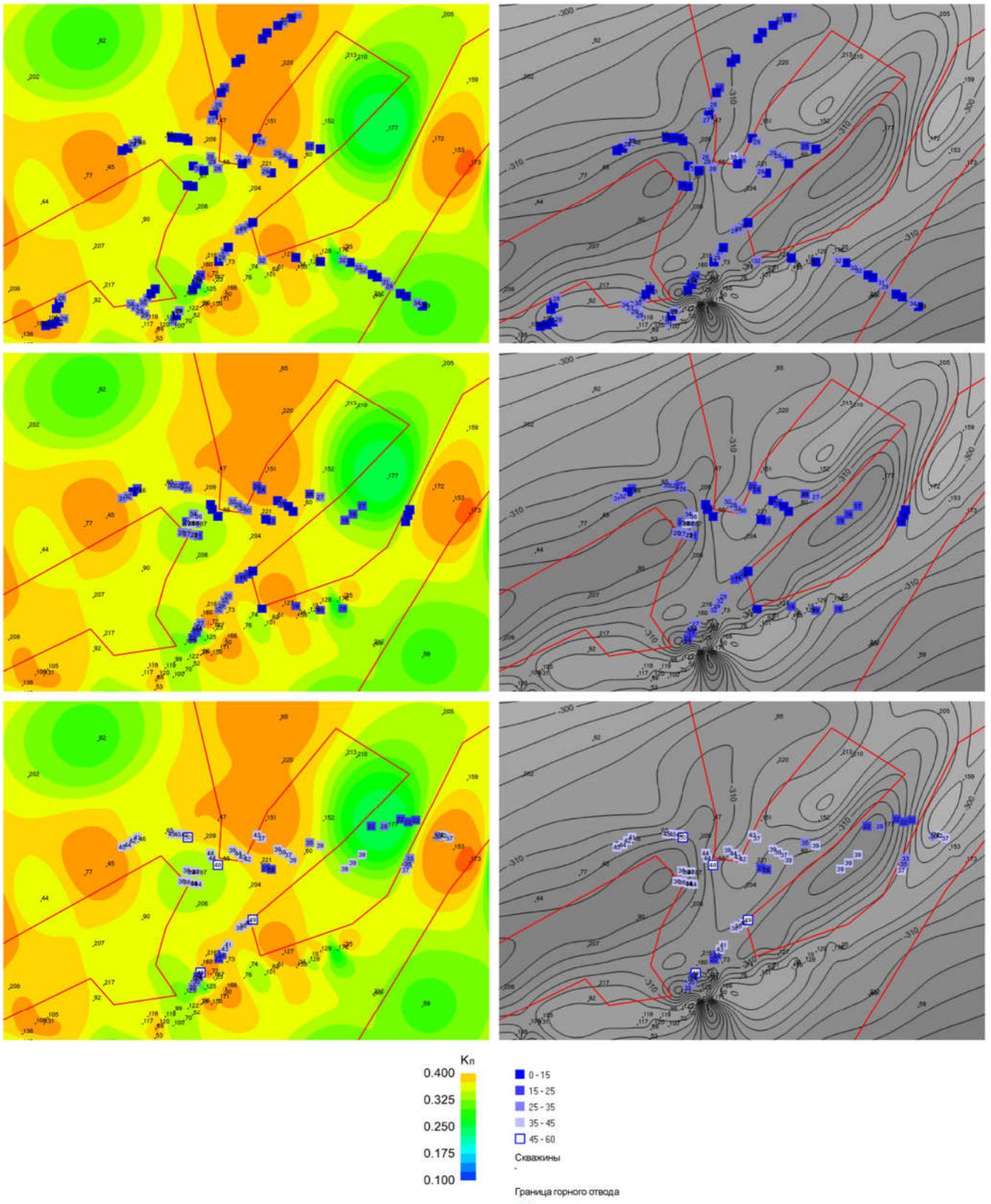


Рисунок 89 – пространственно-временной анализ одновременных результатов электроразведочных работ на ПХГ методом ЗСБ и их сопоставление с результатами геологического моделирования в среде QGIS. Верхний, нижний и средний ряд – различные периоды проведения исследований. Слева – сопоставление газонасыщенности по данным ЗСБ со средней пористостью пласта-коллектора, справа – с глубиной залегания его кровли кровлей.

В отдельных случаях, когда количественная оценка не требуется, а основной целью является лишь подготовка графических материалов для экспертной оценки, такие материалы могут быть подготовлены с использованием систем анализа данных, таких как R или Excel и визуализированы с использованием средств данных программных продуктов и графических редакторов, таких как Inkscape или CorelDRAW (Рисунок 90). Хотя получаемые визуальные модели изучаемых процессов не лишены некоторой наглядности и имеют право на существование, такой способ является наименее производительным и обладает рядом принципиальных ограничений (детально рассмотрены в главе 1), поэтому применяется достаточно редко. Во многих случаях близкие по наглядности материалы могут быть получены с на основе инструментария геоинформационных систем.

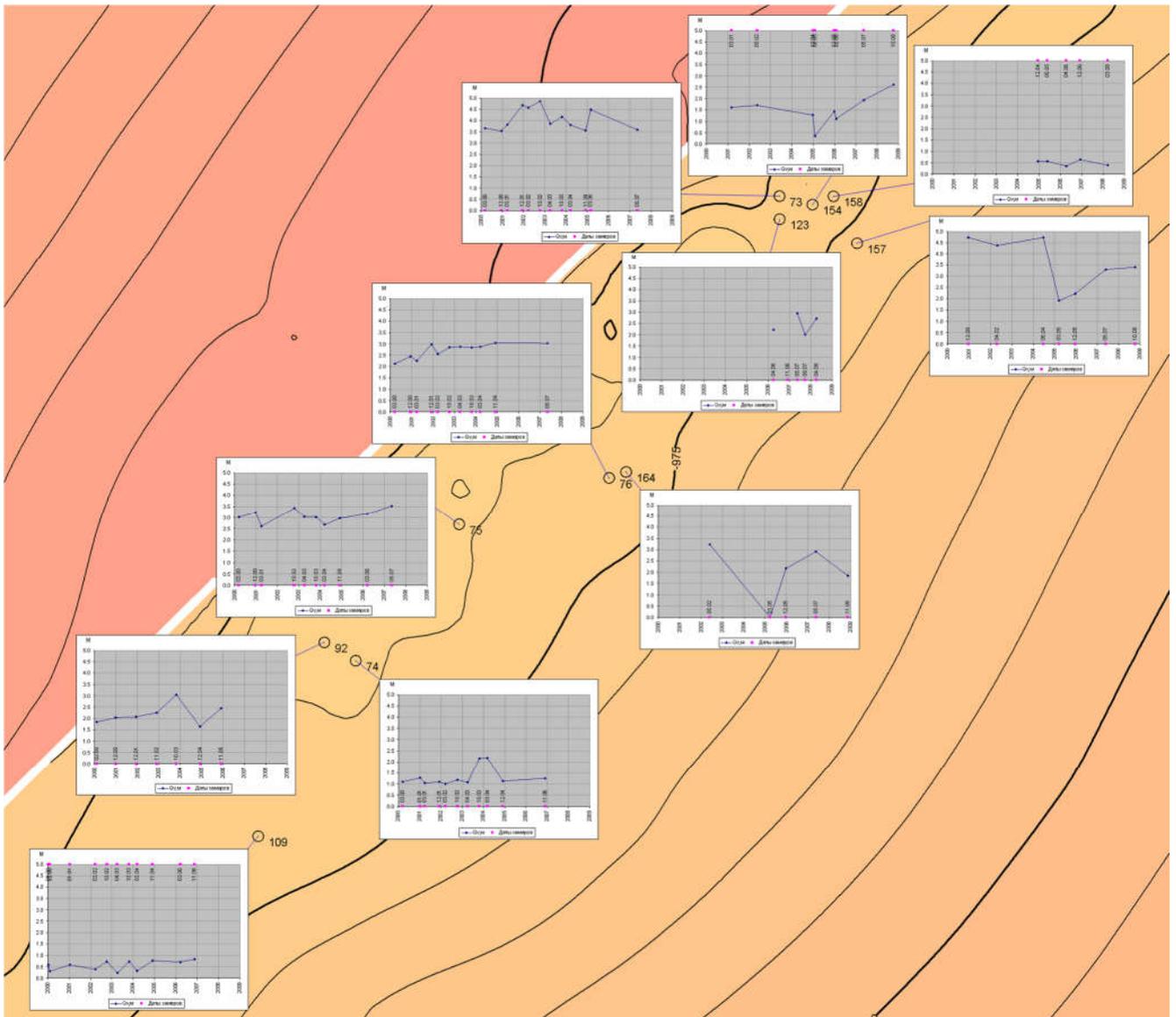


Рисунок 90 – визуальная модель динамики газонасыщенности ПХГ по данным ГИС-контроль, выполненная на основе результатов геологического моделирования (структурная основа) и результатов анализа данных ГИС-контроль (графики по скважинам)

Несмотря на богатые возможности для выполнения различного рода расчётов и исследований, данные ГИС-контроль всё же в первую очередь представляют интерес как источник относительно точных данных о фактическом распределении газонасыщенности пласта-коллектора и контрольных горизонтов. Например, сопоставление по отдельным скважинам расчётных значений газонасыщенности по результатам гидродинамического моделирования и фактических значений газонасыщенности по данным ГИС-контроль позволяет осуществлять проверку качества адаптации гидродинамической модели. Выполнение такого рода проверки позволяет повысить общую достоверность гидродинамического моделирования, отсекая варианты адаптации модели, не соответствующие фактически наблюдаемым результатам. Существенной проблемой при этом является невозможность по данным ГИС-контроль однозначно отличить скопление газа в пласте от заколонного скопления газа, присутствующего лишь в прискважинной зоне. В некоторых случаях разделить данные явления позволяет комплексный анализ геофизических данных (нейтрон-гамма каротаж, гамма-каротаж, термометрия, акустическая цементометрия), с некоторой долей вероятности выявляя интервалы, где скопления газа по всей видимости приурочены к прискважинному пространству. На это могут указывать аномалии по термометрии, фиксирующие заколонные перетоки газа, а также выявленные проблемы цементирования. Достаточно уверенным признаком заколонного скопления газа является выявление аномалии газонасыщенности в интервале с низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

Основной проблемой при разделении аномалий различной природы является крайне высокая трудоёмкость такого анализа, особенно если надо проанализировать такие данные за несколько лет, а также невозможность его полной автоматизации и неоднозначность получаемых результатов. При этом инженер-гидродинамик как правило самостоятельно не может выполнить такую работу, поскольку не обладает достаточной квалификацией для работы с геологическими и геофизическими данными. В то же время, геофизик или геолог, выполняющий подобный анализ, в подавляющем большинстве случаев не обладает навыками работы с гидродинамическими моделями.

Принятый в настоящее время подход к гидродинамическому моделированию не позволяет напрямую учесть имеющиеся геофизические данные по объекту. В некоторых случаях накопленный массив данных по газонасыщению, по всей видимости, позволяет достаточно точно характеризовать свойства объектов и происходящих в нём процессов, но предлагаемые в настоящее время подходы и программные средства геологического и гидродинамического моделирования не способны комплексно рассматривать весь массив имеющихся данных, решая лишь отдельные задачи с его подмножествами. Одновременный учёт значительного массива разновременной информации из существенно отличающихся предметных областей требует

хороших знаний геологии, скважинной и площадной геофизики, петрофизики (и истории развития техники в этих областях), эксплуатации ПХГ, математической геологии, математической физики, гидродинамического моделирования, а в ряде случаев также геоинформатики и навыков программирования. Такая задача может быть решена, либо с привлечением специалистов сверхширокого профиля, хорошо разбирающихся во всех приведённых областях, либо совместной работой разнопрофильных специалистов в тесных проектных группах. На практике оба рассмотренных варианта оказываются малоосуществимы: специалисты столь широкого профиля крайне редки, а между специалистами проектных групп всё равно остаётся недопонимание, к тому же координатор группы, как правило, не может одинаково хорошо разбираться во всех рассматриваемых вопросах. Возможности реформирования системы профессиональной подготовки выходят далеко за рамки данного исследования, но даже если они и возможны, то их результат начнёт проявляться лишь через годы. Наиболее реальным вариантом решения данной проблемы представляется разработка алгоритма, позволяющего автоматически учитывать весь массив имеющихся данных, автоматически выполняя фильтрацию отдельных не вписывающихся в общую закономерность значений. Такая постановка задачи требует рассмотрения даже не алгоритмов конкретных операций геологического, гидродинамического или какого-либо ещё моделирования, а самих базовых принципов моделирования динамических систем.

4.2 Комплексование геологической, геофизической и промысловой информации в единой интерполяционной предсказательной модели ПХГ

При математическом моделировании сложных систем существует два основных подхода. Первый, симуляционный (имитационный), заключается в численном моделировании основных процессов, происходящих в системе и получении интересующих исследователя показателей системы на основе полученной модели. Другой – предсказательный – вместо изучения компонентов системы и моделирования их взаимодействия предлагает рассматривать всю систему в целом, изучая (моделируя) её внутренние закономерности на основе совокупности имеющихся о ней данных. Такой подход наиболее эффективен в случаях, когда нет полноты знаний обо всех процессах, происходящих в системе, не предложено их стройного математического описания, недостаточно данных для задания симуляционной модели, получаемое симуляционное решение неустойчиво. В случае моделирования систем, включающих набор однородных по свойствам пространственных либо временных элементов, предсказательная модель может быть получена интерполяционно, сопоставлением показателей по разным элементам либо за разные периоды. В ряде случаев подобные интерполяционные

модели являются наиболее простым средством реалистичного моделирования сложных многофакторных систем.

В современной практике, традиционным подходом решения широкого круга задач эксплуатации месторождений и ПХГ, которые не могут быть сведены к известным аналитическим моделям, является симуляционный. Несмотря на распространённость, данному подходу присущ целый ряд проблем, зачастую усложняющих или препятствующих эффективному использованию полученных моделей при решении реальных производственных задач. Вместе с тем, в случае моделирования эксплуатации ПХГ, за счёт накапливаемых в ходе их циклической эксплуатации промысловых данных, ряд задач может быть решён не симуляционно, а интерполяционно, позволяя тем самым избежать основных проблем симуляционного гидродинамического моделирования.

Традиционный подход к гидродинамическому моделированию представляет собой попытку дать физически корректное объяснение имеющихся промысловых данных, за счёт построения симуляционной модели, подогнанной (садаптированной) таким образом, чтобы воспроизводить имеющуюся историю эксплуатации объекта. Поскольку моделируются непосредственно фильтрационные процессы, полученная модель позволяет эффективно решать целый ряд прикладных задач, в том числе и экстраполяционных, позволяя тем самым с той или иной степенью достоверности предсказывать поведение системы при практически любых планируемых воздействиях на неё. В то же время данный подход имеет и ряд проблем:

Существующие в настоящее время подходы к симуляционному моделированию фильтрационных процессов используют в качестве основы для вычислений геометрическую сетку, для каждой из ячеек которой принимается постоянство значений моделируемых свойств. Это накладывает ограничения, связанные с детальностью используемой сетки, поскольку получаемая модель не может воспроизводить процессы, требующие детальности сетки выше выбранной. В связи с тем, что современное симуляционное моделирование является крайне ресурсоёмким процессом, а ресурсоёмкость моделирования непосредственно зависит от суммарного количества ячеек модели, сетка, на которой ведётся счёт, в большинстве случаев является довольно грубой. Даже модели, рассчитываемые на современных суперкомпьютерах, в большинстве своём имеют детальность по латерали грубее $10*10$ м. Подобные ограничения могут быть проблемой при моделировании некоторых процессов в прискважинной области, для воспроизведения которых при сеточном моделировании необходима принципиально более высокая детальность сетки. При таком подходе проблематично обеспечить построение оптимальной сетки при моделировании неоднородно разбуренных объектов, таких как ПХГ в водоносных пластах [35]. Существует проблема обеспечения достоверности расчёта при

использовании ячеек с существенно различающимися по длине боковыми гранями либо неортогональными границами, вынуждающая избегать подобных конфигураций сетки;

Для расчёта симуляционной гидродинамической модели необходимо доздание ряда параметров, не поддающихся прямому измерению, которые могут лишь быть вычислены с некоторой степенью достоверности по одной из возможных методик, либо подобраны экспертным путём;

Сама задача симуляционного моделирования заведомо многовариантна, поскольку существующая информация может быть объяснена множеством различных комбинаций условий, задаваемых при подгонке (адаптации) модели под имеющиеся данные. Таким образом, на выходе может быть получено лишь одно из множества возможных приемлемых решений. Различные специалисты могут использовать для адаптации модели различные подходы, фактически находя различные физические объяснения для одного и того же массива имеющихся исходных данных;

Исходные данные для гидродинамического моделирования могут содержать случайные и систематические погрешности, не допускающие нахождения корректного физического решения. Данные можно подвергать предварительной или итерационной проверке и фильтрации, но во многих случаях критерии, позволяющие отличить достоверные данные от ошибочных, отсутствуют. Зачастую детализированные исходные данные отсутствуют. Имеющиеся данные могут быть сгруппированы по кустам, газосборным пунктам, вынуждая исследователя решать дополнительную задачу подбора значений по каждой скважине. Если симуляционное моделирование является многовариантным даже в случае идеализированных исходных данных, то в данном многовариантность адаптации осложняется также и многовариантностью восстановления исходных данных. В наиболее тяжёлых случаях модель просто не может быть сааптирована с использованием традиционных методик и программных средств;

Помимо неопределённости, имеющейся в исходной информации, существуют неопределённости, связанные с используемыми алгоритмами расчета: способом задания численной модели водоносного бассейна, учёта фазовых проницаемостей, решения задач фильтрации в пласте, моделирования связи скважина-пласт, моделирования межпластовых перетоков. Различные алгоритмы и подходы могут давать существенно различающиеся результаты.

Так как традиционный подход к гидродинамическому моделированию предполагает использование в качестве исходных данных результатов геологического моделирования, корректность полученной гидродинамической модели во многом определяется корректностью геологической модели. Но, поскольку геологическая информация фрагментарна и неоднородна

по детальности, достоверности и полноте, геологическая модель отражает лишь одну из возможных интерпретаций имеющихся геолого-геофизических данных [25, 31]. Некоторые условия, в том числе и принципиальные для дальнейшего гидродинамического моделирования, например, сообщаемость отдельных проницаемых интервалов высокоизменчивого пласта-коллектора или проводимость разломов, не могут быть проверены по геолого-геофизическим данным и принимаются волевым путём. Многовариантное геологическое моделирование весьма трудоёмко и в ряде случаев требует применения специализированных программных средств. В отдельных случаях оно может быть оправдано для получения более достоверных оценок запасов нефтегазовых месторождений, но построение на их основе ансамбля гидродинамических моделей слишком трудоёмко и применяется достаточно редко;

Обособленность решения задач геологического и фильтрационного моделирования не позволяет одновременно учесть весь массив имеющихся геолого-геофизических и промысловых данных по объекту. Например, в ходе многолетней циклической эксплуатации ПХГ накапливается значительный объём промысловой информации, косвенно характеризующей геологическое строение объекта эксплуатации, однако при традиционном подходе возможность автоматически учесть его для повышения точности геологического моделирования отсутствует. На практике это может приводить к постановке задач построения геологической модели при недостатке исходных геолого-геофизических данных, адаптации фильтрационной модели на неприемлемой с точки зрения распределения фильтрационно-емкостных свойств геологической основе. Вместо того чтобы взаимно снизить неопределённость в геолого-геофизических и промысловых данных, последовательное решение задач геологического и гидродинамического моделирования склонно к их накоплению. Не позволяя непосредственно выполнять поиск оптимального геолого-фильтрационного решения, традиционный подход может предложить лишь итерационное уточнение обеих моделей либо многовариантное моделирование, что и в том и другом случае существенно увеличивает трудоёмкость процесса;

Изолированность решения задач, относящихся к различным научным дисциплинам, в частности петрофизическому, геологическому и гидродинамическому моделированию, может приводить к возникновению внутренних нестыковок и противоречий различных моделей одного и того же объекта, препятствуя их корректной интеграции [41];

До настоящего времени остаётся открытым ряд общеметодических проблем, связанных с постановкой и решением задач фильтрации [41];

Найденное в ходе адаптации традиционной симуляционной модели решение оптимизируется лишь по отдельным параметрам и не учитывает целого ряда данных, так или иначе характеризующих динамику газонасыщенности объекта. Например, распространённые в

настоящее время программные средства симуляционного гидродинамического моделирования не позволяют автоматизированно учесть имеющийся массив данных ГИС-контроль. В то же время, для объектов ПХГ, работающих в упруговодонапорном режиме, данные ГИС-контроль являются одним из наиболее достоверных источников информации о текущей газонасыщенности;

Найденное в ходе адаптации традиционной симуляционной модели решение может хорошо воспроизводить динамику газовой залежи в целом, при этом полученная модель может давать расхождения по отдельным скважинам или в отдельные исторические периоды.

И всё же, несмотря на перечисленные выше сложности, симуляционный подход позволяет решать целый ряд прикладных задач, хотя и не для всех из них такой способ является наиболее эффективным.

Не следует считать, что данная проблема является уникальной особенностью лишь моделирования нефтегазовых месторождений и ПХГ, либо даже фильтрационного моделирования в целом. Указанная проблема существенно шире, охватывая целый ряд областей человеческой деятельности, связанной с изучением и моделированием сложных многофакторных систем. В настоящее время большинство создаваемых моделей таких систем являются математическими. Для математического моделирования сложных многофакторных систем, которые не могут быть достоверно описаны простыми аналитическими моделями, существует два основных подхода. Первый, симуляционный (имитационный), заключается в численном моделировании основных процессов, происходящих в системе и получении интересующих исследователя показателей системы на основе полученной модели. Другой – предсказательный – вместо изучения компонентов системы и моделирования их взаимодействия предлагает рассматривать всю систему в целом, изучая (моделируя) её внутренние закономерности на основе совокупности имеющихся о ней данных. Такой подход наиболее эффективен в случаях, когда нет полноты знаний обо всех процессах, происходящих в системе, не предложено их стройного математического описания, недостаточно данных для задания симуляционной модели, получаемое симуляционное решение неустойчиво. Данный подход во многом близок к таким понятиям как Data Mining (извлечение знаний из данных), метод Black box (метод чёрного ящика) и трактовке термина «аналитическое моделирование», используемой в некоторых отраслях.

В случае моделирования систем, включающих набор однородных по свойствам пространственных либо временных элементов, предсказательная модель может быть получена интерполяционно, сопоставлением показателей по разным элементам либо за разные периоды. В наиболее простых случаях, для поиска решения могут применяться методы вычислительной геометрии, в более сложных – алгоритмы обучения по прецедентам, генетические алгоритмы и

другие. В ряде случаев подобные интерполяционные модели являются наиболее простым средством реалистичного моделирования сложных многофакторных систем.

Симуляционный подход не позволяет одновременно учесть всю полноту исходных данных, требуя необходимости выполнения промежуточных операций предобработки (препроцессинга) и постобработки (постпроцессинга). При предобработке происходит извлечение подмножества данных, пригодных для использования в пространстве модели и экспертное задание ряда параметров, необходимых для поиска симуляционного решения. При постобработке найденное решение сопоставляется с данными, как использовавшимися, так и не использовавшимися при моделировании, и при необходимости отдельные параметры (в первую очередь – экспертно заданные) модифицируются, и проводится пересчёт симуляции. Данная процедура подгонки (адаптации) производится итерационно вплоть до достижения приемлемого соответствия модели исходным данным. Интерполяционный подход позволяет непосредственно выстраивать связи между всей совокупностью входных и выходных данных, из-за чего необходимость в проведении каких-либо промежуточных процедур отсутствует (Рисунок 91). Интерполяционный подход лишён эффектов неполноты адаптации, из-за которых полученная модель, являясь в целом верной, может давать некорректные решения по отдельным пространственно-временным областям (Рисунок 92).

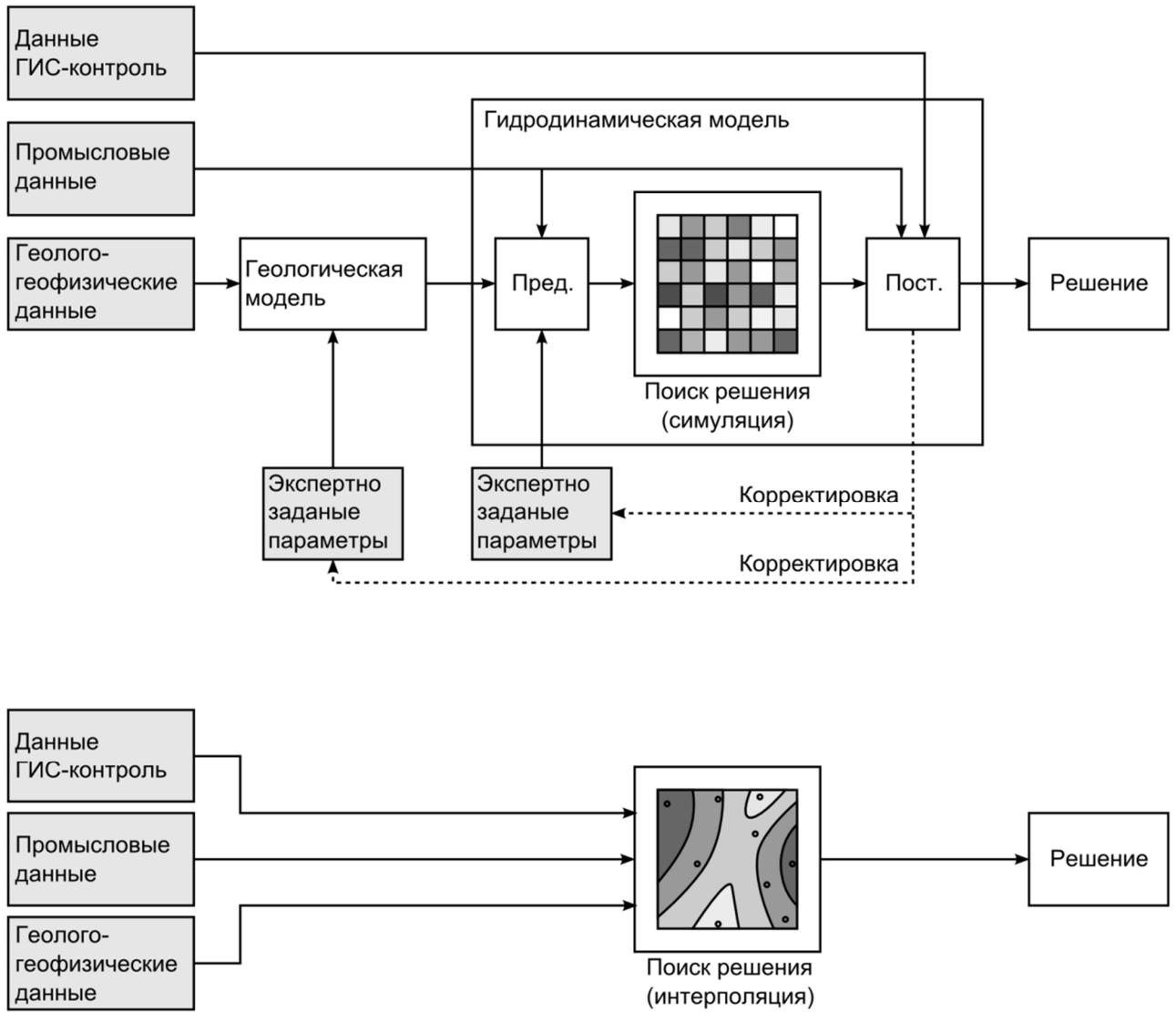


Рисунок 91 – упрощённая концептуальная модель симуляционного (сверху) и интерполяционного (снизу) моделирования

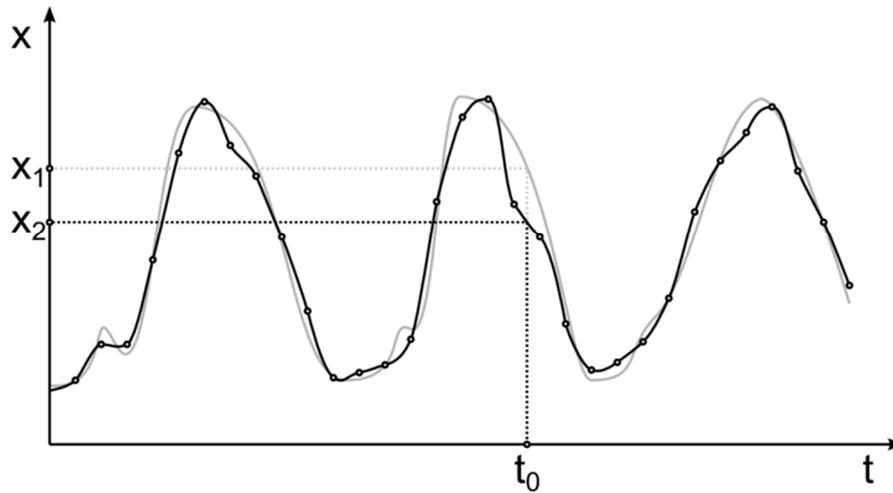


Рисунок 92 – эффект неполноты адаптации при симуляционном моделировании на примере моделирования некоторого процесса $f=x(t)$. Решение симуляционной модели (показано серым), являясь в целом корректным, в интересующей области (по интересующей скважине) на момент t_0 даёт решение x_1 , отклоняющееся от ожидаемого. При интерполяционном решении той же задачи (показано чёрным) при отсутствии внутренних противоречий в исходных данных подобные эффекты исключены

В зависимости от специфики решаемой задачи, исторических причин и других факторов, традиционным подходом к моделированию сложных систем в тех или иных предметных областях могут быть как предсказательный (интерполяционный), так и симуляционный; отдельные задачи могут иметь и аналитическое решение:

В метеорологии существует возможность вместо крайне ресурсоёмкого моделирования процессов, происходящих в атмосфере на основе показаний метеостанций и ряда дополнительных параметров, прогнозировать погоду в конкретной точке на основе непосредственно самих показаний с ближайших метеостанций. Поскольку изменения погоды цикличны, значительная ошибка при таком прогнозе маловероятна. В простейшем случае, подобным образом работают и народные приметы;

В задаче прогнозирования дорожного трафика, анализ всех факторов, от которых зависит реальная загруженность автомагистралей, требует получения и анализа крайне большого объема разнородной информации. Вместе с тем, существует возможность относительно точно прогнозировать предельную скорость автомобилей на любую дату непосредственно на основе данных о скорости на данном участке за предыдущие периоды времени, чем в настоящее время пользуется целый ряд компаний, предоставляющих пользовательские Интернет-сервисы, позволяющие оперативно решать подобные задачи. Поскольку загруженность автомагистралей

изменяется в определённых пределах и подчинена определённой временной цикличности, значительная ошибка при таком прогнозе маловероятна;

В науках о Земле успешно применяется как симуляционный, так и интерполяционный подход к описанию одних и тех же процессов. Например, геотектоника решает задачу изучения динамики земной коры на основе интерполяции наблюдаемых данных и их экстраполяции в прошлое с использованием тех или иных концепций, в то время как геодинамика решает ту же задачу симуляционно, рассматривая формирование земной коры как внешнее проявление изучаемых и моделируемых геодинамических процессов;

При петрофизическом прогнозе существует возможность отказаться от поиска физического объяснения наблюдаемых параметров, используя вместо этого непосредственное установление связи между входными данными (скважинные геофизические исследования) и выходными данными (фильтрационно-емкостные свойства по данным исследований керна и гидродинамических исследований) на основе методов распознавания. Применение такого подхода позволяет в ряде случаев существенно повысить производительность и достоверность интерпретации [63, 62];

При интерпретации данных сейсморазведки традиционно применяется поиск интерполяционного решения, распространяющего фрагментарные скважинные данные на массив сейсмических материалов. В то же время, в последние годы развивается симуляционный подход, при котором моделируются непосредственно процесс осадконакопления, а сейсмические материалы используются для заверки полученных результатов;

Геологическое моделирование традиционно подразумевает решение интерполяционной задачи, применяя для этого различные алгоритмы, основанные на вычислительной геометрии и статистике. Эффективные способы симуляционного решения отдельных задач геологического моделирования (моделирование процессов осадконакопления, образования разрывных нарушений) начали предлагаться лишь в последние годы;

При проведении прогнозных расчетов по реконструкции насосного оборудования или проектировании новых поглощительных скважин традиционно выполняется аналитическое моделирование гидравлического сопротивления шлейфа. Вместе с тем, полученные расчетные значения в ряде случаев могут быть существенно ниже фактических величин, определенных непосредственно по промысловым данным, приводя к значительной недооценке гидравлических потерь в шлейфах поглощительных скважин и, как следствие, необходимой мощности насосного оборудования. Существенно более надёжные результаты могут быть получены интерполяционно, на основе промысловых данных, характеризующих работу аналогичных шлейфов [6].

Подобная возможность существует и при решении задач, связанных с анализом промысловых данных ПХГ. В отличие от месторождений, здесь имеется значительный массив данных, характеризующих циклический процесс эксплуатации в предыдущие сезоны закачки и отбора. Зная режимы работы скважин в предыдущие сезоны и полученные при этом показатели их работы, в первую очередь, динамику отбора газа по ним и значения их водного фактора, существует возможность прогнозировать режимы работы на будущие сезоны, оптимальные по тому или иному критерию. Это может быть реализовано как с помощью методов машинного обучения, например, алгоритмов обучения по прецедентам, так и существенно более простыми средствами, например с использованием уравнений, аппроксимирующих найденные зависимости, либо даже экспертно. Один из простых, но эффективных способов решения указанной задачи, уже доказавших свою эффективность на практике, приведён в работах [7, 8].

В перспективе, применение аналогичного подхода с использованием для поиска решения методов распознавания позволит использовать всю совокупность имеющейся геолого-геофизической и промысловой информации для изучения процессов, протекающих при эксплуатации искусственных газовых залежей и управления ими. В отличие от симуляционного гидродинамического моделирования, подобная интерполяционная модель может, например, непосредственно учесть весь массив имеющихся данных ГИС-контроль, являющихся крайне ценным источником данных о фактическом распределении газонасыщенности в пространстве и времени. Данные, лежащие в основе интерполяционной модели, непосредственно включают все реально существующие физические эффекты, в том числе и не учитываемые при традиционном гидродинамическом моделировании: динамику ФЕС пласта-коллектора, вызванную всеми возможными факторами, взаимовлияния скважин, защемление и растворение газа, всевозможные химические и тепловые эффекты, влияющие на динамику газовой залежи, в том числе и не изученные на настоящий момент. В этом заключается одно из ключевых преимуществ интерполяционного предсказательного моделирования. Другим преимуществом данного подхода является возможность автоматизированного разрешения внутренних противоречий в исходных данных за счёт перехода от строго интерполяционного решения к аппроксимационному. В то же время, такой подход не лишён и ограничений: интерполяционное решение будет наиболее корректно лишь в условиях, так или иначе укладываемых в накопленный опыт. В случае моделирования процессов, никогда раньше не протекавших на объекте (отбор во время закачки, закачка во время отбора, остановка работы хранилища, существенное увеличение или уменьшение объёма хранимого газа), существует риск получения некорректного решения. В этом случае расчет корректнее производить на основе традиционной гидродинамической модели. В то же время, даже при использовании традиционного гидродинамического моделирования, существует возможность сопоставления

решений, получаемых при адаптации модели, с более устойчивым и однозначным интерполяционным решением, полученном для длительных исторических периодов «спокойной» работы хранилища. Такой подход даст возможность повысить достоверность адаптации традиционной симуляционной модели и в дальнейшем использовать её в случаях, когда она наиболее эффективна, например, при необходимости прогноза физически корректного отклика системы на какое-либо нестандартное воздействие при отсутствии исторических данных о фактическом отклике системы в аналогичных условиях.

Поскольку в случае комплексного геолого-геофизического моделирования на основе распознавания, построение модели объекта и протекающих в нём процессов выполняется не поэтапно, а единовременно, традиционные пакеты геологического моделирования, ориентированные на поэтапное построение модели, оказываются малопригодны для решения данной задачи. Несмотря на то, что данные программные продукты, как правило, позиционируются как программные комплексы трёхмерного моделирования, средства хранения, обработки и визуализации даже трёхмерных данных, не говоря о данных существенно больших размерностей, как правило, оказываются пригодны лишь для выполнения узкого круга задач, заложенных в традиционную последовательность построения геологической модели. В данном же случае важным требованием является возможность удобной работы с многомерными данными, что подразумевает широкий круг задач их хранения, обработки и визуализации. С другой стороны, поскольку при комплексном геолого-геофизическом моделировании на основе распознавания работа ведётся на основе непосредственно зафиксированных параметров без необходимости выполнения цепочки промежуточных построений, отчасти, требования к используемым программным продуктам оказываются в чём то ниже, чем к программному продукту традиционного геологического моделирования.

Фактически, имеющиеся наблюдения геолого-геофизических и промысловых параметров рассматриваются как точки N-мерного пространства, в котором на основе данных наблюдений и ограничений, накладываемых на их возможную вариацию, выполняется восстановление поля соответствующей размерности с дальнейшим построением сечений в интересующих исследователя подпространствах. В зависимости от используемого аппарата прогнозирования получаемое поле может быть как плавно изменяющимся, так и содержать резкие ступенчатые переходы, позволяющие воссоздавать характер изменения свойств при резких литологических и стратиграфических переходах, сопровождающихся скачкообразным изменением ФЭС моделируемого блока недр. Так, например, использование алгоритмов Марковско-Байесовского прогнозирования, реализованное в пакете «Векторный прогноз», позволяет непосредственно на основе исходных данных, без промежуточных построений стратиграфических и литолого-

фациальных моделей воспроизводить в межскважинном пространстве изменчивость свойств [80]. Введение в используемый алгоритм прогнозирования элементов перекрёстной проверки позволяет также рассматривать полученное решение как оптимальное с точки зрения минимизации величины ошибки прогнозирования. В зависимости от заданного исследователем количества градаций свойств и характера деления свойства на градации (линейное, равночастотное, экспертно-заданное) могут быть получены как более грубые, но устойчивые решения, так и менее устойчивые, но более детальные (Рисунок 93). Получаемые многомерные решения могут быть рассечены плоскостями в интересующих исследователя координатах (Рисунок 94).

В случае прогноза ФЕС в качестве исходных параметров могут использоваться данные ГИС-бурение (в нормированной форме), данные литологического описания пород, результаты ГДИС и результаты исследования керна. В случае моделирования процесса эксплуатации ПХГ дополнительно может учитываться массив данных ГИС-контроль, пластовые давления, объёмы закачки и отбора по скважинам.

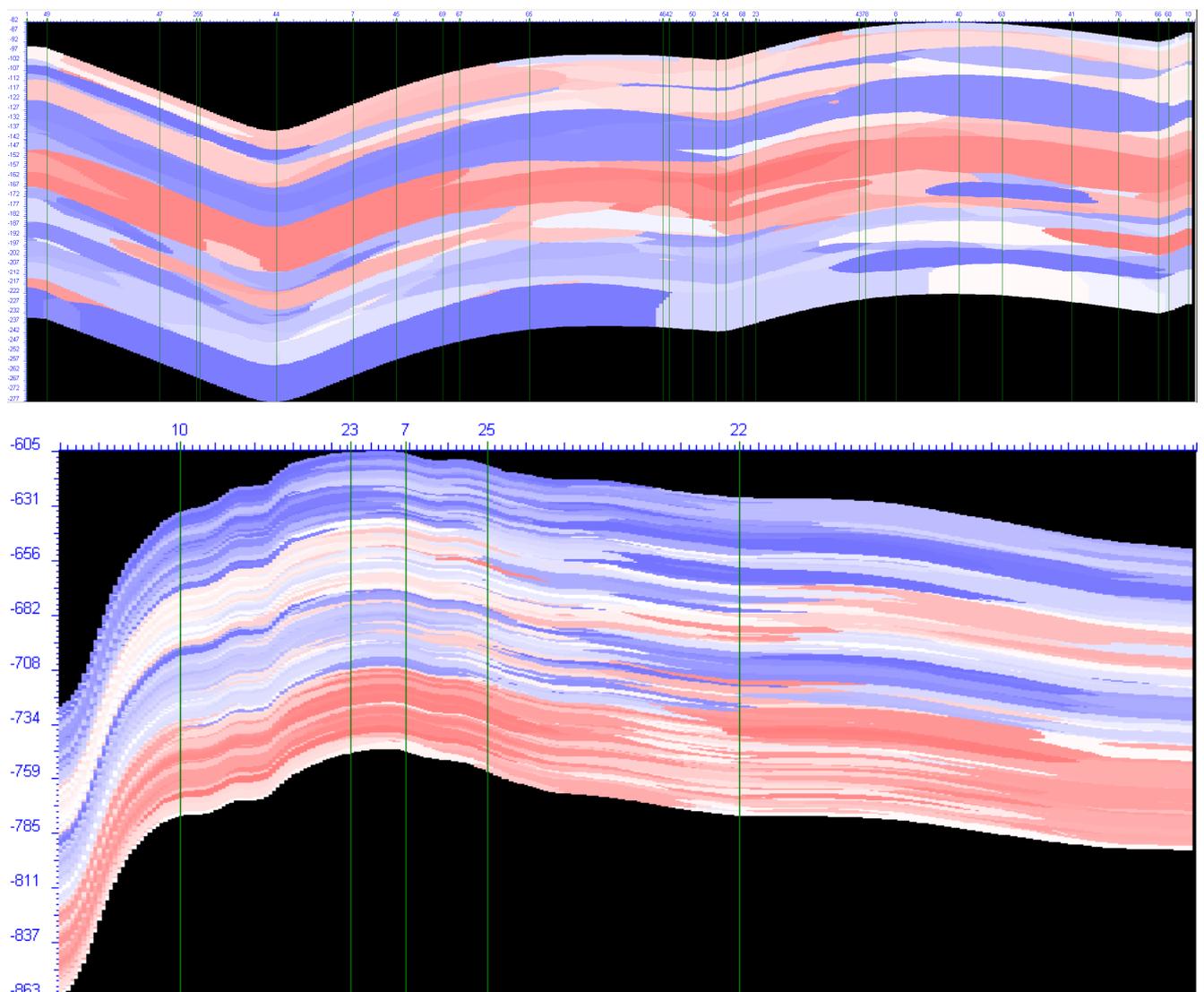


Рисунок 93 – пример обобщённой и детальной геологической модели, построенной на базе

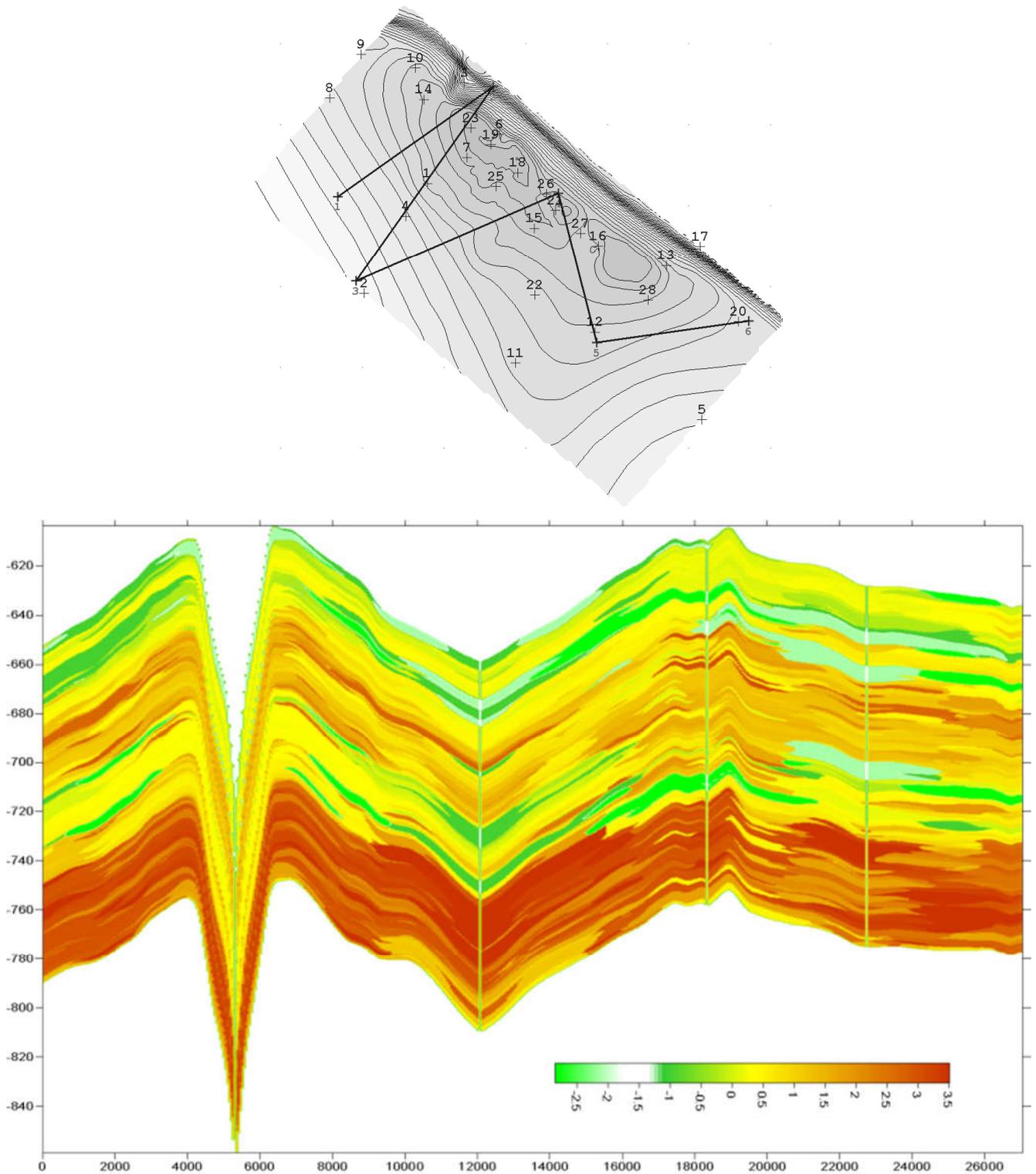


Рисунок 94 – общий вид нечёткой марковской 3D модели ПХГ: сверху – схема расположения профиля, внизу – сечение модели по профилю

В качестве наиболее эффективного аппарата прогнозирования могут рассматриваться методы распознавания, реализованные, как на основе статистического подхода, как в приведённом выше примере, так и на основе искусственных нейронных сетей различных архитектур, значительная часть недостатков которых, таких как крайняя длительность обучения

и «эффект переобучения», в настоящее время в значительной степени преодолены. Длительное время именно «эффект переобучения», при котором приводящий в случае слишком длительного обучения сети, она слишком тесно адаптировалась к данным обучающей выборки, выдавая при этом грубые ошибки на реальных данных, рассматривался как один из основных рисков использования данного подхода. В настоящее время, с развитием алгоритмов обратного распространения ошибки и «глубокого обучения» многослойных сетей данный подход всё шире применяется для ответственных задач, например, для построения самообучающихся систем управления автотранспортом. Ещё одним подходом, несколько более примитивным, но при этом более предсказуемым и простым, является геометрическая и геометрико-статистическая интерполяция. Основными геометрическими методами, которые могут использоваться в качестве универсальных интерполяторов, и уже имеют программную реализацию для работы с многомерными данными, являются различные реализации сплайн-интерполяции, метода обратных взвешенных расстояний (*inverse distance weighting*), локальной полиномиальной интерполяции (*local polynomial interpolation*). Так, первые два метода реализованы в GRASS GIS, второй и третий – в Golden Software Voxler, все три метода, а также ряд других реализован в R. Интерполяционные модели на основе геометрической интерполяции могут применяться для предварительного «разведочного» моделирования изучаемых объектов и заверки результатов, получаемых методами распознавания. Основным ограничением геометрических интерполяторов является предельная размерность пространства, в котором может выполняться моделирование: так, Voxler позволяет работать выполнять интерполяцию в пространстве размерности не более 3, GRASS GIS – не более 4. Работу с данными высокой размерности поддерживает R, однако отсутствие у него традиционно оконно-кнопочного графического пользовательского интерфейса (все операции задаются пользовательскими скриптами) делает его непригодным для работы значительной частью пользователей с недостаточной технической подготовкой. Реализации геометрико-статистических интерполяторов существуют как в пакетах геологического моделирования, так и в отдельных программных продуктах, в том числе и свободных, например, как SGeMS – с графическим интерфейсом пользователя) и R [72] (с пакетом Gstat) – с командным интерфейсом пользователя. Предельная размерность пространства, в котором может выполняться моделирование и, соответственно, размерность получаемых моделей, при использовании данных программных продуктов, является 3.

Таким образом, в качестве программной основы для построения комплексных геолого-геофизических моделей на основе распознавания, могут выступать как специализированные программные продукты геологического моделирования-прогнозирования, наподобие рассмотренного выше пакета «Векторный Прогноз», так и модульные пакеты на основе

геоинформационных систем, пакетов анализа данных и систем многомерной визуализации, таких как QGIS или GRASS GIS, R, ParaView или ParaViewGeo. В этом случае, все используемые средства могут относиться к классу свободного ПО. Некоторые вспомогательные операции подготовки и анализа, обработки и визуализации трёхмерных пространственных и пространственно-временных данных, (например, при необходимости лишь их геометрической интерполяции) могут быть выполнены с использованием проприетарных коммерческих пакетов анализа многомерных данных и геологического моделирования, реализующих методы геометрической и геометрико-статистической интерполяции, таких как Golden Software Voxler, SGeMS и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постановка задачи, при которой геологическое моделирование ПХГ в водоносном пласте было рассмотрено в качестве самостоятельной задачи, позволило выполнить систематизацию специфических аспектов геологического моделирования ПХГ, требующие применения специализированных методик моделирования. Предложенная систематизация легла в основу разработанного автором перечня методических приёмов, повышающих эффективность геологического моделирования ПХГ и позволяющих обеспечить корректность получаемых моделей. Одним из результатов выполненной работы является подтверждение принципиальной возможности построения корректной геологической модели ПХГ на основе существующих на рынке программных продуктов геологического моделирования. Разработан перечень требований к программному продукту геологического моделирования, необходимых для обеспечения эффективного процесса геологического моделирования ПХГ. Поскольку отдельные инструменты, реализованные в данных программных продуктах, могут приводить к получению некорректных результатов моделирования на основе даже полностью корректных исходных данных отдельно были рассмотрены эффективные методики и рабочие процессы геологического моделирования ПХГ, реализуемые на базе существующего специализированного ПО.

Для анализа работы процедур количественной оценки, основанных на получении групповых статистик, в условиях неоднородности скважинной информации, были построены математические модели, воспроизводящие неоднородность размещения скважин ПХГ в водоносном пласте. На примере объектов ПХГ в водоносных пластах рассмотрен вопрос применимости процедур геологического моделирования и количественной оценки достоверности моделирования на основе групповых статистик. Проанализированы основные подходы к анализу и прогнозу пространственного распределения свойств, применяемые в современном геологическом моделировании, и их устойчивость к неоднородности исходных данных, даны рекомендации по способам использования конкретных алгоритмов. На примере построенной автором математической модели показано влияние степени неоднородности исходных данных на корректность групповых статистик, получаемых при выполнении отдельных процедур геологического моделирования и экспертизе геологических моделей. Обоснована применимость процедур количественной оценки результатов моделирования на различных этапах построения геологической модели.

В связи с тем, что большинство ведущих программных продуктов геологического моделирования являются закрытыми собственническими разработками, использование которых в практической деятельности накладывает ряд технологических, экономических и юридических

рисков, был выполнен анализ этих рисков, а также рассмотрена возможность реализации свободной геолого-геофизической программной платформы, реализованной на принципах СПО. Анализ показал, что, хотя отдельные её элементы уже могут быть реализованы на основе уже имеющегося инструментария многомерных геоинформационных систем, таких как GRASS GIS, систем анализа данных, подобных R, и систем визуализации, подобных ParaView и дальнейшего их совершенствования, значительно более реалистичным является сценарий частичного или полного открытия наработок одного из ведущих пакетов геологического моделирования, ставящее его в принципиально более выигрышное по отношению к конкурентам положение. В то же время, поскольку данное событие зависит от ряда неизвестных факторов, и не может быть достоверно спрогнозировано, в ближайшие годы стоит ориентироваться прежде всего на использование одного из уже присутствующих на рынке комплексов геологического моделирования, поскольку из-за всё возрастающей сложности данных программных продуктов, появление новых игроков на данном рынке из года в год становится всё менее вероятным.

Впервые предложены принципы построения комплексной геолого-геофизической модели ПХГ, позволяющей одновременно учитывать как геолого-геофизические данные, характеризующие первоначальное геологическое строение объекта ПХГ, так и массив накапливаемых при его эксплуатации данных ГИС-контроль, пригодной для уточнения гидродинамических моделей ПХГ по данным ГИС-контроль. Показаны как преимущества, так и ограничения данной методики. Рассмотрена перспективная возможность использования аналогичного подхода для получения моделей, учитывающих весь комплекс геолого-геофизических и промысловых данных, накапливаемых при эксплуатации ПХГ.

Поскольку реализация предлагаемой методики выходит далеко за рамки возможностей пакетов геологического моделирования и реализованного в них программного инструментария, дополнительно были рассмотрены возможности геоинформационных систем и систем анализа данных, показана принципиальная возможность построения комплексной геолого-геофизической модели ПХГ на основе соответствующих программных продуктов, существующих на рынке. Важно, что значительная часть рассматриваемых средств относится к классу СПО с открытым исходным кодом, использование которого позволяет избежать большинства технологических, экономических и юридических рисков, связанных с использованием закрытого собственного ПО.

Результаты работы могут применяться при геологическом моделировании объектов нефтегазовой отрасли, однако большинство положений справедливо при моделировании любых неравномерно изученных пористых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений РД 153-39.0-047-00// Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. – Москва. – 2000г.
2. Методические рекомендации по подсчёту геологических запасов нефти и газа объёмным методом // ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», Москва-Тверь, 2003г.
3. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газовых месторождений (Часть 1. Геологические модели) // ОАО «ВНИИОЭНГ». – Москва. – 2003г. – 164с.
4. Краткий терминологический словарь по подземному хранению газа / Составители: С.Н. Бузинов, К.И. Джафаров, С.А. Кузнецов, Г.Н. Рубан. – Москва. – Газпром ВНИИГАЗ. – 2012г. – 160с.
5. Методические рекомендации к корреляции разрезов скважин. Под реакцией профессора И.С. Гутмана / И. Гутман, И. Балабан, В. Староверов, и др. – «Недра». – Москва – 2013г. – 112с.
6. Алькин В.А., Ротов А.А., Атаева А.Ф. Анализ существующей методики оценки потерь давления в шлейфе поглочительных скважин при эксплуатации ПХГ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6 – С.5-7
7. Алькин В.А., Кулешов В.Е. Оптимальный технологический режим скважин при эксплуатации ПХГ, созданных в малоамплитудных пластах с активными водами // Газовая промышленность. – 2014. – № 11 – С.47-50
8. Алькин В.А., Дегтерёв А.Ю., Кулешов В.Е. Методический подход к определению эффективного технологического режима работы скважин подземного хранилища газа на основе его геологической модели // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 3 (19) – С.121-126
9. Аронов В.И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ // Москва. – «Недра». – 1990г. – 301с.
10. Бабкин И.В. Технология определения газонасыщенности продуктивных коллекторов по данным ядерно-геофизических методов ГИС в обсаженных газовых скважинах газа / диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва. – 2014. – 214с.
11. Билибин С.И. Технология создания и сопровождения трехмерных цифровых геологических моделей нефтегазовых месторождений / диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва. – 2010. - 281с.

12. Вистелиус А.Б. Заметки по аналитической геологии // Докл. АН СССР. – 1944г. – т. 44. – №4. – С.27-31
13. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии (определение предмета, изложение аппарата) // Л.: Наука. – 1980г. – 389с.
14. Воронов С.А. Методы прогнозирования и регулирования эксплуатации искусственных газовых залежей ПХГ с единой водонапорной системой / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва. – 2013г.
15. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Томск. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012г. – 99с.
16. Гриб Н.Н., Самохин А.В., Черников А.Г. Методологические основы системного исследования массива горных пород // Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН. – 2000г. – 104с.
17. Григорьева А.И., Колодин М.Ю.. Свободное программное обеспечение в науке и образовании — проблемы, решения и перспективы использования // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 8. С. 78-92
18. Давыдов А.Н., Рубан Г.Н., Шерстобитова Г.А., Хан С.А., Королев Д.С. Создание матрицы напряжений гдовского горизонта Невского подземного хранилища газа для уточнения мест заложения эксплуатационных скважин // Георесурсы. – №4 (36). – 2010г. – С.35-39.
19. Давыдов А.Н., Рубан Г.Н., Михайловский А.А., Шерстобитова Г.А., Хан С.А., Королев Д.С. Уточнение геологического строения современной ловушки Щелковского подземного хранилища газа // Георесурсы. – №4 (36). – 2010г. – С. 19-23.
20. Дегтерёв А.Ю., Исаков А.Я., Кан В.Е., Оптимизация алгоритма геологического моделирования подземного хранилища газа в водоносном пласте // Георесурсы. – №4. – 2010г. – С.12-16
21. Дегтерев А.Ю., Применение геоинформационного подхода при геологическом моделировании подземных хранилищ газа // 11-я Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли». – Москва. – 2010г.
22. Дегтерёв А.Ю., Воронов С.А., Применение программных продуктов ROXAR при моделировании объектов ПХГ // 11-я конференция пользователей ROXAR России и СНГ. – Анталия. – 2010г.
23. Дегтерёв А.Ю. Количественная оценка достоверности геологического моделирования в условиях нестационарности геостатистических характеристик геологической среды // II научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва. – 2010г.

24. Дегтерёв А.Ю. Проблемы и перспективы использования свободного программного обеспечения (СПО) при решении геолого-геофизических задач // Экспозиция Нефть Газ. – 2011г. – №4. – С.55-60
25. Дегтерёв А.Ю., Гришин А.В., Кан В.Е., Контроль факторов геологической неопределённости при моделировании ПХГ // III Международная научно-практическая конференция «Подземное хранение газа: Надёжность и эффективность» (UGS-2011) . – Москва. – 2011г.
26. Дегтерёв А.Ю., Применение геоинформационного подхода при системном контроле эксплуатации подземных хранилищ газа // научный симпозиум «Неделя горняка-2011». – Москва. – 2011г.
27. Дегтерёв А.Ю., Проблемы и перспективы использования свободного программного обеспечения (СПО) при решении геолого-геофизических задач // семинар «Инновации в нефтяной геологии и геофизике». – Москва. – 2011г.
28. Дегтерёв А.Ю. Анализ факторов риска использования закрытых программных продуктов и перспектив использования свободного программного обеспечения в нефтегазовой промышленности при решении научных задач // Аналитик-2011: сб. науч.-техн. обзоров. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва. – 2012г. – 201с. – С.78-107
29. Дегтерёв А.Ю. Актуальные методы геологического моделирования ПХГ // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва. – Газпром ВНИИГАЗ. – 2012г. – С.112-122
30. Дегтерёв А.Ю. Концепция и эталонная модель свободной геолого-геофизической программной платформы // XII ежегодная международная конференция «Гальперинские чтения – 2012». – Москва. – 2012г
31. Дегтерёв А.Ю., Кан В.Е. Проблемы достоверности моделирования неоднородно изученных геологических объектов // III Международная научно-практическая конференция и выставка «Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения» (WGRR-2013). – Москва. – 2013г.
32. Дегтерёв А.Ю. Применимость результатов поинтервального петрофизического прогноза для трёхмерного геологического моделирования // Каротажник. – 2014г. – N4 – С.3-22
33. Дегтерёв А.Ю. Геоинформационное сопровождение создания и эксплуатации подземных хранилищ газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015г. – N12. – С.42-50
34. Дегтерев А.Ю., Алькин В.А., Черников А.Г., Гришин А.В. Перспективы использования интерполяционного предсказательного моделирования при решении задач эксплуатации подземных хранилищ газа // Газовая промышленность. – 2015г. – N8. –С.75-79

35. Дегтерёв А.Ю., Кан В.Е. Актуальные проблемы геологического моделирования подземных хранилищ газа в водоносных пластах // Вести газовой науки. – 2016г. – N1(25). – С.157-169
36. Дюбрул О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных // EAGE, 2002г.
37. Еланский М.Ю. Опыт геомоделирования подземного хранилища газа в системе "Геомод" по данным геолого-геофизической информации / Каротажник. – 2007. – N9. – С.145-152.
38. Елобогоев А. Гипотеза стационарности в геостатистике и её формы: к вопросу о применимости геостатистических методов на практике Новосибирский региональный центр геоинформационных технологий «ООО Дата Ист»
<http://esri-cis.ru/upload/iblock/838/GeostatisticalAnalystGyp.pdf>
39. Ермилов О.М., Ремизов В.В., Чугунов Л.С., Ширковский А.И. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа // «Наука» . – Москва. – 1996 г. – 541с.
40. Жардецкий А.В. Геологическое моделирование для геолого-геофизического мониторинга объекта эксплуатации углеводородного сырья / диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Москва. – 2000г.
41. Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С., Николаев В.А., Закиров И.С., Анিকেев Д.П. Современные основы теории и практики разработки месторождений нефти и газа. Ч. 1, 2 // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2010. – № 2 (2). – С. 24, 25.
42. Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей // ООО «ИПЦ«Маска»» . – Москва. – 2008г. – 272с.
43. Закревский К.Е. Геологическое моделирование 3D / ООО «ИПЦ «Маска»», Москва, 2009г. - 376с.
44. Зубарев С.А. Развитие технологий мониторинга за объектом подземного хранения газа (на примере центрального ПХГ) / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Ухта. – 2010г.
45. Иванов М.К., Калмыков Г.А., Белохин В.С., Корост Д.В., Хамидуллин Р.А. Петрофизические методы исследования кернового материала. Учебное пособие в 2-х книгах / Москва. – Изд-во Моск. ун-та. – 2008г. – 113с.
46. Исхаков А.Я., Матушкин М.Б., Темиргалеев Р.Г., Черников А.Г. Моделирование изменчивости свойств породного массива на основе нечётких марковских последовательностей // Подземное хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: Сб. науч. тр. - М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008г. – С.255-265
47. Исхаков А.Я. Контроль пластовых потерь и герметичности подземных хранилищ газа на основе геофизических методов и геолого-технологического моделирования / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва. – 2013г.

48. Ипатов А.И., Креницкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов // Москва. – Научно-издательский центр «регулярная и хаотическая динамика». – 2006г.
49. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др.; Под ред. В.С. Тикунова Геоинформатика: Учеб. Для студ. Вузов. Издание 3-е переработанное и дополненное / Москва. – Издательский центр «Академия». – 2010. – Т1-400с., Т2-432с.
50. Кашик А.С., Гогоненков Г.Н., Билибин С.И., Перепечкин М.В., Ковалевский Е.В. Система геологического моделирования Dv-Geo как пример российского инновационного бизнеса // Экспозиция Нефть Газ. – 2011г. – N5. – С.11-15
51. Ковалевский Е.В. Геологическое моделирование на основе геостатистики / программа курса лекционного тура 2011-2012г.г. EAGE. – 2011г. – 117с. [Geological Modelling on the Base of Geostatistics By Evgeniy Kovalevskiy, Student Lecture Tour, Russia & CIS 2011-2012, Course note]
52. Ковалевский Е.В. Отечественное программное обеспечение нефтегазовой отрасли (геология и геофизика): проблемы, взгляды, инициативы / 3-я международная конференция «ЭНЕРКОН-2012». – Москва. – 2012г
53. Ковалев А.Л., Крапивина Г.С., Корнев Г.А. Адаптация технологической модели Кущевского ПХГ путем подбора распределения проницаемости // Подземное хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: Сб. науч. тр. - М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008г. – С.112-125
54. Ковалев А.Л., Крапивина Г.С. Расширение адаптивных возможностей алгоритмов прямых и обратных задач при построении технологической модели Кущевского ПХГ // Подземное хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: Сб. науч. тр. - М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008г. – С.126-138
55. Корнеев А.В. Как победить в кибервойне? // Бурение&Нефть. – N 6. – 2011г. – с.58-63
56. Корчуганова Н.И., Корсаков А.К. Дистанционные методы геологического картирования: Учебник / Москва. – КДУ. – 2009. – 288с.
57. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пособие. – Пермь. – Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – 2007г. – 315с.
58. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач // Москва. – «Радио и связь». – 1990г. – 544с.
59. Ларин Г.В. Современные отечественные программные средства изучения нефтегазового месторождения // Аналитик-2009: сб. науч.-техн. обзоров. – М.: Газпром ВНИИГАЗ. – 2010г. – 314с. – С.167-199

60. Латышова М.Г., Мартынов В.Г., Соколова Т.Ф.. Практическое руководство по интерпретации данных ГИС / Учебное пособие для вузов // Москва. – ООО "Недра-Бизнесцентр". – 2007г. – 327с.
61. Левыкин Е.В. Технологическое проектирование хранения газа в водоносных пластах. – Москва. – Недра. – 1973г.
62. Матушкин М.Б., Черников А.Г. Создание петрофизических моделей пластовых систем на основе нелинейного марковского прогнозирования // Вестник ЦКР Роснедра. – 2011г. – № 5. – С.33-37
63. Матушкин М.Б., Черников А.Г. Пакетная обработка геолого-геофизических данных для создания геолого-технологической модели // Горный информационно-аналитический бюллетень [Mining informational and analytical bulletin]. – 2011. – Отд. вып. 1. – С.1-5
64. Матушкин М.Б., Черников А.Г. Прогнозирование петрофизических характеристик объектов эксплуатации ПХГ на основе марковского многофакторного моделирования // Применение методов математического моделирования и информатики для решения задач газовой отрасли: сб. науч. статей. – Москва. – Газпром ВНИИГАЗ. – 2012г. – 170с. – С.99-105
65. Михайловский А.А. Научные основы регулирования и контроля количества газа в пористых пластах подземных хранилищ / диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва. – 2010г.
66. Михайловский А.А. Аналитический контроль объемов газа в пластах-коллекторах ПХГ / А.А. Михайловский. – Москва. – Газпром ВНИИГАЗ. – 2013. – 250с.
67. Паршин А. Открытые данные и ГИС-технологии в отечественной геологоразведке: эффективность, проблемы и перспективы / Международная конференция «Открытые ГИС 2015». – Москва. – 2015г.
http://gisconf.ru/pres/1_22_1320_parshin.pptx
<https://youtu.be/rP7DynjassI>
68. Пахомов В.И. Общая теория обнаружения месторождений полезных ископаемых // Москва. – ООО «АРТЕКС-ЛЮКС». – 2002г. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
69. Перепечкин М.В. Технология построения геологических моделей по геолого-геофизическим данным в программном комплексе DV-Geo / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва. – 2007. – 142с.
70. Рубан Г.Н. Повышение эффективности системы геолого-геофизического контроля за эксплуатацией подземных хранилищ газа / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва. – 2008г.
71. Рыжов А.Е., Жуков В.С., Иселидзе О.В., Семёнов Е.О. Изменение газовой проницаемости пород-коллекторов при циклических изменениях эффективного давления // Подземное

- хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: Сб. науч. тр. - М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008г. – С.238-246
72. Савельев А.А., Мухарамова С.С., Пилюгин А.Г., Чижикова Н.А. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R): Учебное пособие / Казань. – Казанский университет. – 2012г. – 120 с.
 73. Савельев А.А., Мухарамова С.С., Чижикова Н.А., Пилюгин А.Г. Теория пространственных точечных процессов в задачах экологии и природопользования (с применением пакета R) / Казань. – Изд-во Казан. ун-та. – 2014. – 146 с.
 74. Савельева Е.А., Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика // Москва. – Наука. – 2010. – 327с
 75. Салин Ю.С. Стратиграфия: порядок и хаос / Рос. АН, Дальневост. отд-ние, Ин-т комплекс. анализа регион. пробл. – Владивосток. – «Дальнаука». – 1994г. – 221с.
 76. Самсонов Р.О., Бузинов С.Н., Рубан Г.Н., Джафаров К.И. История организации подземного хранения газа в СССР – России // Георесурсы. – №4 (36). – 2010г. – С.2-8.
 77. Солдаткин С.Г. Комплекс исследований для создания гидродинамической модели эксплуатации Калужского подземного хранилища газа // Георесурсы. – №4 (36). – 2010г. – С.24-25.
 78. Темиргалеев Р.Г., Исхаков А.Я., Черников А.Г., Кан В.Е., Гришин А.В., Биргерс Э. Опыт моделирования сложнопостроенного геологического объекта ПХГ, созданного в водоносном пласте // Подземное хранение газа. Полвека в России: опыт и перспективы: Сб. науч. тр. - Москва. – ООО «ВНИИГАЗ». – 2008г. – С.247-254
 79. Черников А.Г. Методика прогнозирования литогенетических свойств углей по комплексу геолого-геофизических данных // Сб. IX Всесоюзного угольного совещания, Ростов-на-Дону. – 1991г. – кн.2. – С.72-74
 80. Черников А.Г., Матушкин М.Б., Дегтерёв А.Ю. 3D моделирование петрофизических свойств сложнопостроенных объектов ПХГ на основе алгоритма нечетких Марковских последовательностей // Вести газовой науки. – 2016г. - N1(25). – С.147-156
 81. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ данных по биологии и экологии с использованием R // Тольятти. – Кассандра. – 2013г. – 314с.
 82. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей: Пер. с англ. / Предисловие Ю.П. Адлера, Ю.А. Кошевника // Москва. – Финансы и статистика. – 1988г. – 263с.
 83. Atsushi Kajiyama, Nobuyuki Ikawa, Shinji Masumoto, Kiyoji Shiono, Venkatesh Raghavan Three dimensional Geological Modeling by FOSS GRASS GIS. – Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference. – Bangkok, Thailand. – 12-14 September 2004

84. Kovalevskiy E.V. Fuzzy geological model // Petroleum Geostatistics 2007, Cascais, Portugal.
85. Pyrcz M.J., Deutsch C.V. Declustering and Debiasing / Searston, S. (eds.) // Geostatistical Association of Australasia. – Newsletter 19. – October 2003
86. Stallman R. The GNU Manifesto // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 1985. – N3
87. Распоряжение от 17 декабря 2010 г. №2299-р О плане перехода федеральных органов исполнительной власти и федеральных бюджетных учреждений на использование свободного программного обеспечения (2011 - 2015 годы)
<http://government.ru/gov/results/13617/>
88. Итоговая резолюция 3-й международной конференции по актуальным вопросам инновационного развития нефтегазовой отрасли ЭНЕРКОН-2012
http://www.enercon-ng.ru/common/img/uploaded/exhibitions/enercon/doc/ENERCON2012_resolution.pdf
89. http://ru.wikipedia.org/wiki/Свободная_лицензия
90. Исследование степени использования открытого ПО в правительственных учреждениях США
<http://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=29330>
91. Обзор свободной геотектонической ГИС GPLates
<http://gis-lab.info/qa/gplates-overview.html>
92. <http://www.top500.org/statistics/list/>
93. All new e-governance projects must work on open source operating systems: Draft
http://articles.economictimes.indiatimes.com/2011-07-06/news/29743620_1_open-source-draft-policy-hardware
94. Получение бесплатных космических снимков Landsat TM,ETM+ через Glovis
<http://gis-lab.info/qa/landsat-glovis.html>
95. Новый источник доступных данных ASTER
<http://gis-lab.info/projects/aster/about.html>
96. Каталог данных OrbView-3
<http://gis-lab.info/qa/orbview3.html>
97. Corona - описание и получение данных
<http://gis-lab.info/qa/corona.html>
98. Глобальная цифровая модель рельефа ETOPO1
<http://gis-lab.info/qa/etopo1-overview.html>
99. Описание и получение данных SRTM
<http://gis-lab.info/qa/srtm.html>
100. Источники открытых геолого-геофизических данных

<http://gis-lab.info/qa/geology-geophysics-open-data-sources.html>

101. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>

102. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>

103. <http://plugins.qgis.org/community-map/>

104. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/User:Firefishy/osm-country-stats>

105. http://ru.wikipedia.org/wiki/Red_Hat