

На правах рукописи



ДЕГТЕРЁВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ

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

Специальность 25.00.10 –
«Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2016г.

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ») и на кафедре геофизики Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ).

- | | | |
|-------------------------------|---|--|
| Научный руководитель | – | доктор технических наук, профессор
Афанасьев Виталий Сергеевич |
| Официальные оппоненты: | – | доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАЕН,
заслуженный деятель науки
Российской федерации
Ампилов Юрий Петрович |
| | – | кандидат технических наук
Перепечкин Михаил Валентинович |
| Ведущая организация | – | акционерное общество «Центральная
геофизическая экспедиция» (АО «ЦГЭ») |

Защита диссертации состоится «22» сентября 2016 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 212.121.07, созданного при ФГБОУ ВО «Российский Государственный Геологоразведочный Университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ) в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Геологоразведочного Университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ) и на сайте ВАК.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Романов Виктор Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Деятельность газовой отрасли на территории РФ в осуществлении экспорта газа является одной из основных статей дохода Российской Федерации. Как внешний, так и внутренний спрос на газ имеет неравномерность, связанную как с сезонными изменениями температур, так и с погодными аномалиями. Для обеспечения возможности своевременного и полного исполнения договорных обязательств по экспортным поставкам газа необходимо иметь оперативные резервы, пригодные для покрытия сезонной и пиковой неравномерности спроса на газ. В настоящее время основным способом компенсации различных форм неравномерности газопотребления является закачка летних излишков газа в подземные хранилища газа (ПХГ) и последующий его отбор при возникновении спроса на газ в осенне-зимние месяцы. Наиболее распространёнными в мире типами ПХГ являются подземные хранилища в истощённых месторождениях, в водоносных пластах и в солевых кавернах. В России в основном получили развитие ПХГ на базе истощённых месторождений и водоносных пластов.

В настоящее время значительная часть задач создания и эксплуатации ПХГ решается с использованием методов математического моделирования. Традиционно моделирование ПХГ, аналогично моделированию нефтегазового месторождения, включает построение трёх взаимоувязанных моделей: петрофизической, геологической и фильтрационной (гидродинамической). Геологическая модель комплексирована всю имеющуюся информацию о геологическом строении объекта, являясь основой для дальнейших гидродинамических расчётов, на основании которых принимается большинство технологических решений по его эксплуатации. Задача моделирования ПХГ традиционно рассматривается как частный случай задачи моделирования нефтегазового месторождения, в связи с чем для моделирования ПХГ традиционно предлагаются те же программные продукты и, как следствие, те же инструменты моделирования и методические подходы, что и для нефтегазовых месторождений, а также, хотя и с некоторыми оговорками, те же нормативные и методические руководства.

К настоящему времени накоплен значительный объём публикаций, затрагивающих различные аспекты как геологического моделирования в целом, так и моделирования нефтегазовых месторождений. 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.

Хотя многолетняя практика моделирования ПХГ позволила выявить ряд специфических особенностей, отличающих данную задачу от задачи моделирования нефтегазовых месторождений, специализированная литература, посвящённая гео-

логическому моделированию ПХГ, в настоящее время отсутствует. Имеющиеся публикации, посвящённые геологическому моделированию месторождений, не учитывают специфики функционирования ПХГ как геолого-технологического объекта с циклической динамикой газонасыщенности и системой геофизического и промыслового контроля, ориентированной на его циклическую эксплуатацию. Существующая потребность в достоверных моделях ПХГ потребовала разработки научно обоснованной технологии геологического моделирования, в полной мере учитывающей их специфику, а также оценки применимости методик и программных инструментов, используемых для их геологического моделирования.

Цель диссертационной работы – разработка научно обоснованной технологии геологического и комплексного геолого-геофизического моделирования подземных хранилищ газа в водоносных пластах, учитывающей как специфику их функционирования, так и особенности информации, накапливаемой в ходе их разведки и дальнейшей 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 ПХГ.

Методы исследования:

1. Обобщение и анализ мирового опыта геологического моделирования ПХГ по материалам имеющихся 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 программных продуктов с открытым исходным кодом.

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

4. Математическое моделирование процедур, реализованных в типовых программных продуктах геологического моделирования месторождений с целью оценки корректности их работы в условиях ПХГ.

5. Разработка комплекса методических приёмов 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 и способов комплексирования получаемых данных.

7. Опробование разработанной технологии при решении задач технологического проектирования и объектного мониторинга ПХГ России и ближайшего зарубежья.

Научная новизна работы

- Впервые геологическое моделирование ПХГ в водоносном пласте рассмотрено в качестве самостоятельной задачи, систематизированы её специфические черты, и на основе данной систематизации предложена научно обоснованная методика геологического моделирования ПХГ;

- На примере объектов ПХГ в водоносных пластах изучены условия применимости процедур геологического моделирования и количественной оценки достоверности моделирования на основе групповых статистик в условиях пространственной неоднородности данных и несовпадения баз измерения. Обоснована применимость процедур количественной оценки на различных этапах построения геологической модели. Впервые предложен критерий оценки неоднородности изученности объекта, позволяющий оценить применимость традиционного инструментария моделирования, не учитывающего возможную неоднородность пространственного распределения исходных данных;

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

Основные защищаемые положения:

1. Комплекс методик моделирования, обеспечивающий достоверное геологическое моделирование ПХГ в водоносном пласте с использованием программных средств геологического моделирования, разработанных для нефтегазовых месторождений, на основе учёта специфики ПХГ как моделируемого объекта и особенностей работы применяемых программных инструментов в условиях ПХГ.

2. Способы получения корректных количественных оценок геолого-геофизических параметров при несовпадении баз измерения или неоднородном пространственном распределении точек наблюдения, а также способ оценки степени этой неоднородности на основе предложенного автором критерия.

3. Способы комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ на основе данных, характеризующих геологическое строение объекта, и результатов текущих геофизических исследований, позволяющие воспроизводить пространственное распределение и динамику газонасыщенности пласта-коллектора и контрольных горизонтов.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании методов, применяемых для геологического моделирования неоднородно изученных объектов, а также обосновании возможности применения интерполяционного предсказательного моделирования для решения задачи комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ. Обоснование условий применимости существующих процедур 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 обоснована разработанными автором концептуальными и математическими моделями и подтверждена путем сопоставления результатов моделирования, полученных с использованием предлагаемых методик и подходов, с фактическими данными эксплуатации ПХГ, 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 ПХГ, принимается на основе результатов их геолого-технологического моделирования. 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».

Поскольку в основе геолого-технологической модели ПХГ лежит геологическая модель, выступающая в качестве основы для гидродинамических расчётов, важной практической задачей является обеспечение её достоверности. Результаты предлагаемой работы направлены на решение данной задачи, предлагая научно обоснованную технологию геологического моделирования ПХГ, учитывающую как специфику функционирования ПХГ, так и особенности информации, накоп-

ливаемой в ходе их разведки и дальнейшей эксплуатации. Показана принципиальная возможность реализации данной технологии с использованием инструментов, реализованных в уже существующих на рынке программных продуктах геологического моделирования нефтегазовых месторождений, разработан перечень требований к программному продукту геологического моделирования ПХГ.

Практическая значимость рассмотренной в работе задачи комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ связана с необходимостью получения информации о процессах, происходящих в ходе эксплуатации ПХГ в водоносных пластах, на основе использования массива накапливаемых при контроле эксплуатации ПХГ геофизических и промысловых данных. Результаты комплексного геолого-геофизического моделирования могут использоваться для повышения достоверности и снижения трудоёмкости симуляционного гидродинамического моделирования ПХГ, а также в ситуациях, когда построение и адаптация полноценных гидродинамических моделей нецелесообразны или проблематичны.

Область применения результатов

Результаты работы могут применяться при построении и экспертизе моделей ПХГ в водоносных пластах, выполнении работ по объектному мониторингу и до-разведке ПХГ. Часть предлагаемых методов может быть использована для повышения достоверности геологического моделирования 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 технологий геологического и комплексного геолого-геофизического моделирования ПХГ и их апробации в рамках работ по технологическому проектированию и объектному мониторингу ПХГ.

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». Корректность и эффективность предлагаемых методик подтверждена их успешным использованием при моделировании более десяти ПХГ, созданных и эксплуатируемых в различных геологических условиях.

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 году.

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.т.н. А.А. Михайловскому, д.г.-м.н. Н.Н. Соловьеву, 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.

Краткое содержание работы

Во **введении** рассматривается предметная область подземного хранения газа, обосновывается необходимость геологического моделирования объектов ПХГ, очерчивается существующий в данной области круг проблем и имеющиеся публикации по данной теме. Рассмотрен традиционный подход к моделированию нефтегазовых месторождений, в сопоставлении с которым ведётся дальнейшее рассмотрение специфики моделирования ПХГ.

В **первой главе** приводится анализ современного состояния рынка программных продуктов трёхмерного геологического моделирования месторождений и ПХГ. Одним из наиболее важных вопросов, регламентирующих взаимоотношения разработчиков и пользователей программных продуктов, является вопрос лицензирования разрабатываемого программного обеспечения (ПО). Одной из актуальных тенденций рынка программного обеспечения является использование программного обеспечения, развиваемого под лицензиями, декларирующими свободу использования, изучения, распространения и модификации программ – свободного ПО. Показан закономерный характер постепенной миграции на использование свободного ПО во всех отраслях, проанализированы причины наличия некоторой задержки данных процессов в нефтегазовой отрасли. Продемонстрировано, что в краткосрочной перспективе при выборе программной платформы моделирования ПХГ следует полагаться на уже существующие на рынке программные продукты геологического моделирования, хотя большинство из них в настоящее время всё ещё является закрытыми собственническими разработками.

В настоящее время для моделирования ПХГ традиционно используются программные продукты, первоначально разработанные для нефтегазовых месторождений, что накладывает отпечаток на заложенные в них методики и инструменты. Как вопрос корректного применения заложенных в них инструментов для моделирования ПХГ, так и вопрос разработки специализированного программного продукта, непосредственно ориентированного на решение задачи моделирования ПХГ, требует предварительного анализа специфики ПХГ и методов их моделирования, чему посвящены вторая и третья главы данной работы.

Вторая глава посвящена рассмотрению специфики подземных хранилищ газа, как моделируемых объектов. Показано, что наиболее специфичными с точки зрения применяемых методик являются ПХГ в водоносном пласте, на примере которых ведётся дальнейший анализ. В качестве основных особенностей подземных хранилищ, как объектов моделирования, рассмотрены следующие:

- Отсутствие (для ПХГ в водоносном пласте) начальных запасов газа. Текущие объёмы газа и конфигурация залежи могут изменяться 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. 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 длительно эксплуатируемых ПХГ в водоносном пласте). Источниками данных о фильтрационно-емкостных свойствах пород при создании хранилища являются данные каротажа, результаты исследований керна и 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 являются интегральными, неопределённость прогноза проницаемости по скважинам существенно выше;

- Недостаточная первоначальная геолого-геофизическая изученность объектов (в случае ПХГ в водоносном пласте). Фактически, на первоначальных этапах проектирования ПХГ, структуры, как правило, недоизучены. Из-за отсутствия результатов площадных геофизических исследований имеющиеся геологические построения зачастую опираются только на скважинные данные, представляя собой их авторские интерпретации. Архивные материалы не всегда присутствуют в полном объёме, зачастую первичные материалы отсутствуют и доступны лишь результаты их интерпретации и т.д.;

- Высокая неоднородность (в случае ПХГ в водоносном пласте) площадного распределения скважин, и, вследствие этого – крайне неоднородная охарактеризованность объекта данными. Технология эксплуатации ПХГ подразумевает крайне плотное размещение эксплуатационных скважин в купольной части структуры. Поскольку ПХГ зачастую создаются в пластах, обладающих высокой внутренней изменчивостью коллекторских свойств, неоднородность распределения скважинных данных может приводить к ситуации, когда плотность скважин в некоторых областях оказывается явно недостаточной для однозначного воспроизве-

дения имеющейся изменчивости свойств, в то время как для других – достаточной и даже избыточной;

- Неоднородность распределения исходных скважинных данных по разрезу, связанная с особенностями эксплуатационного бурения, при котором вскрываются верхняя часть пласта-коллектора. 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. В случаях, когда исследования ГИС-бурение проводятся поинтервально без перекрытия интервалов, может накапливаться систематическая неоднородность охарактеризованности разреза данными, что в терминах математической статистики может рассматриваться как цензурированность выборки исходных данных относительно генеральной совокупности;

- Ограниченная применимость площадных геофизических исследований. В случае ПХГ в водоносном пласте, из-за отсутствия первоначального углеводородного насыщения пласта-коллектора, контрастная среда, которая могла бы быть выражена в геофизических полях, отсутствует. Разрешающая способность современной сейсморазведки зачастую оказывается недостаточна не только чтобы охарактеризовать внутреннее строение терригенного пласта-коллектора, но и даже достоверно провести его границу. Наиболее информативными площадные геофизические исследования могут быть в задачах прослеживания контрастных по свойствам границ, контролирующих залегание покрышки пласта-коллектора. Основным же источником информации о строении и свойствах пластов-коллекторов, покрышек и основных стратиграфических границ моделируемого блока недр остаются скважинные данные;

- Особенности доизучения объекта в процессе эксплуатации. 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, может возникать необходимость проведения специальных мероприятий по их доизучению;

- Вопросы герметичности ПХГ. Если большинство месторождений углеводородов являются замкнутыми системами, формирующимися в масштабах геологического времени, герметичность которых не вызывает сомнений, то создание ПХГ в водоносном пласте требует обоснования герметичности объекта и дальнейшего контроля в ходе его эксплуатации. При эксплуатации ПХГ газ может накапливаться в проницаемых интервалах пласта-покрышки, мигрировать в вышележащие горизонты. В большинстве случаев это вызвано техническими причинами, однако возможны и геологические: недостаточные флюидоупорные свойства покрышки, наличие литологических или тектонических окон, проницаемых тектонических разломов и т.п.

- Разнонаправленность и существенная нестационарность фильтрационных процессов в пласте. Если отбор углеводородов из месторождения является в целом однонаправленным процессом, 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 материалам ГИС-бурения и его дальнейшее использование в качестве неизменного параметра. В случае ПХГ в водоносном пласте это означает, что свойства пласта принимаются такими, какими они наблюдались по скважинам ещё до начала их активной эксплуатации. В случае длительной циклической эксплуатации ПХГ данные изменения со временем могут накапливаться и возможно достигать значимых величин, по крайней мере, в прискважинных областях;

- 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 потребность максимально возможного снижения детальности трёхмерной сетки геологической модели. В то же время, существует целый ряд задач, требующих увеличения детальности геологической модели. Данный конфликт интересов делает задачу перемасштабирования трёхмерной сетки геологической модели нетривиальной задачей, требующей для каждого ПХГ поиска своего оптимального решения;

- Возможность уточнения представлений о геологическом строении объекта по данным эксплуатации ПХГ. Значительный и постоянно увеличивающийся объём геофизических и промысловых данных, косвенно характеризующих геологическое строение объекта, даёт возможность оценить правильность создания модели. В отдельных случаях получаемая информация позволяет охарактеризовать участки с недостаточной геолого-геофизической изученностью.

Третья глава рассматривает непосредственно методы геологического моделирования ПХГ. Хотя многие задачи моделирования взаимосвязаны и требуют комплексного решения, для удобства изложения последовательность построения геологической модели рассматривается в качестве набора последовательно выполняемых технологических операций:

- подготовка пространственных данных
- проверка и подготовка скважинных данных, выполнение межскважинной корреляции, структурное моделирование;
- получение количественных оценок на основе скважинных данных ПХГ на различных этапах моделирования;
- моделирование распределения свойств в пространстве;
- ремасштабирование модели для гидродинамического моделирования;
- снижение неопределённости моделирования, использование и уточнение моделей.

Основой построения любых геологических моделей являются данные, характеризующие пространственное положение элементов моделируемой системы – пространственные данные. В случае ПХГ с длительной историей эксплуатации зачастую возникает задача взаимного сопоставления и уточнения многовариантных пространственных данных, не в полной мере соответствующих между собой как в целом – с точки зрения используемых систем координат и картографических проекций, так и локально. В ряде случаев ситуация осложняется невозможностью восстановления положений ликвидированных скважин при проведении современной геодезической съёмки положений их устьев. В современных программных продуктах геологического моделирования инструменты для решения подобного класса задач отсутствуют. Автором предложена оригинальная технология подготовки пространственных данных для геологического моделирования, их взаимной проверки и увязки, а также восстановления отсутствующих данных.

Для оценки применимости использования результатов петрофизического прогноза, предоставляемых в поинтервальной форме, автором впервые был изучен вопрос влияния округления значений фильтрационно-емкостных свойств на достоверность геологического моделирования. При геологическом моделировании ПХГ, особенно с длительной историей эксплуатации, как правило, происходит уточнение пластовых отбивок по скважинным данным с учётом пространственной изменчивости их положения и распределения свойств. Использование поинтервальных результатов петрофизического прогноза, опирающихся на ранее принятые пластовые отбивки, делает выполнение данной процедуры проблематичным. В случае моделирования изменчивых толщ, характерных, например, для ПХГ в водоносных пластах, создаваемых в терригенных отложениях Восточно-Европейской платформы, важной задачей становится достоверное воспроизведение в модели не только горизонтальной, но и вертикальной изменчивости параметра проницаемости, которая, в случае использования результатов петрофизического прогноза в поинтервальной форме оказывается искажена ещё до начала собственно этапа геологического моделирования.

Для оценки влияния данных факторов автором были построены математические модели, воспроизводящие искажения изменчивости свойств, возникающие при поинтервальном прогнозе. Показано, что даже в идеализированном случае,

воспроизводящем групповые статистики распределения значений сигнала, происходит существенное искажение его внутренней структуры (Рисунок 1).

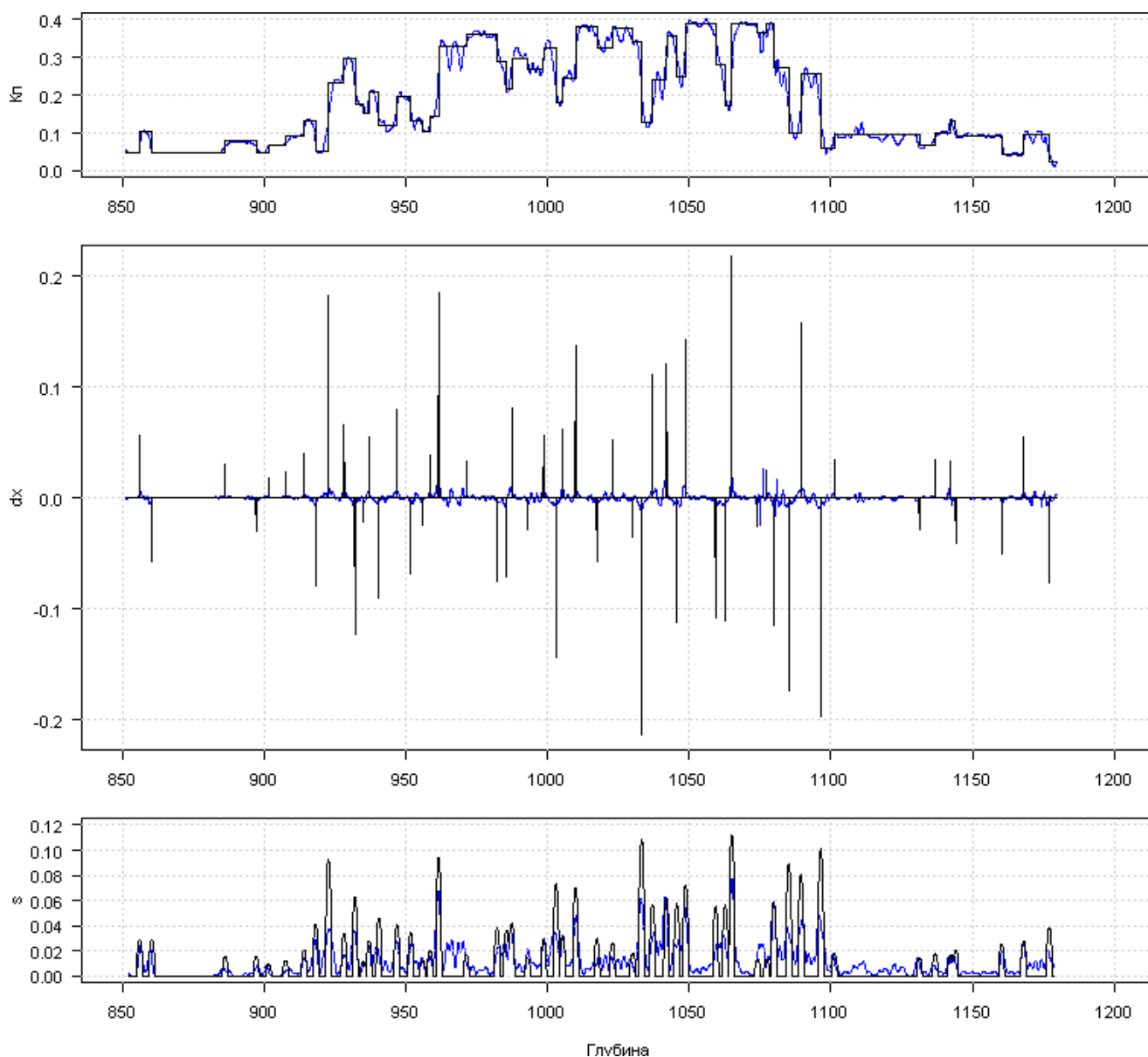


Рисунок 1 – Влияние поинтервального представления данных на локальные параметры сигнала. Сверху – сопоставление сигнала в исходной форме (синий) и его поинтервальной аппроксимации (черный), в центре – моментального приращения их значений, снизу – среднеквадратических отклонений в скользящем окне

Эффективные подходы к организации работы со скважинными данными ПХГ в значительной степени связаны не только с используемыми методическими подходами и инструментами моделирования, но и подходами к организации потоков данных, возникающих в ходе взаимодействия геологов-моделистов и петрофизиков. Например, при применении отдельных методик петрофизического прогноза в качестве промежуточного результата работ автоматизированного рассчитывается сводный геолого-геофизический разрез моделируемого объекта (Рисунок 2). При непосредственном участии автора была изучена возможность

его использования при выполнении корреляции ПХГ в качестве эталонного разреза по фиктивной скважине. Показано, что данный подход может быть эффективен даже при работе с неоднородно изученными объектами, имеющими высокую литологическую изменчивость, такими как ПХГ в водоносных пластах, создаваемые в терригенных отложениях Восточно-Европейской платформы.

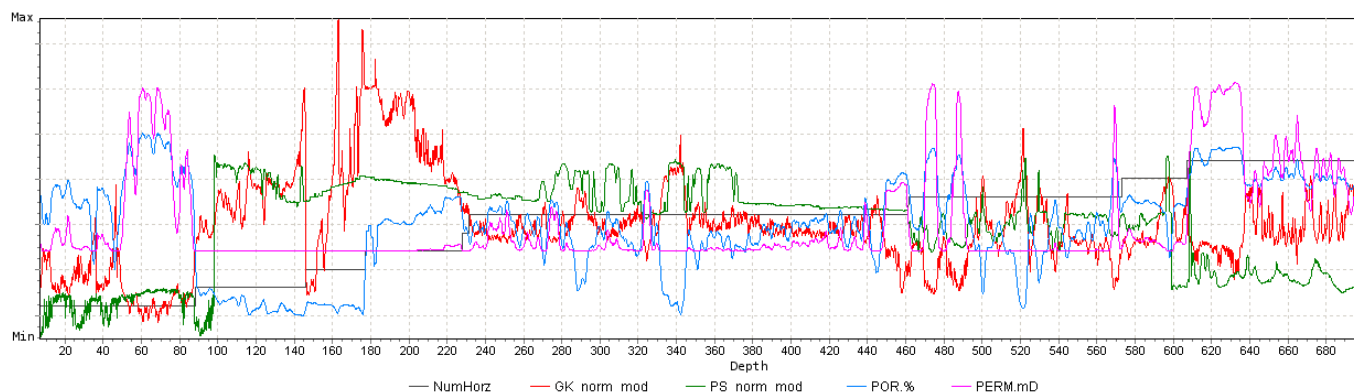


Рисунок 2 – Сводный геолого-геофизический разрез одного из ПХГ

Поскольку использование подобных процедур диктует необходимость одновременного выполнения операций, относящихся как к петрофизическому, так и к геологическому моделированию, для их реализации необходима разработка специализированной системы организации работ и возникающих при этом потоков данных (Рисунок 3).

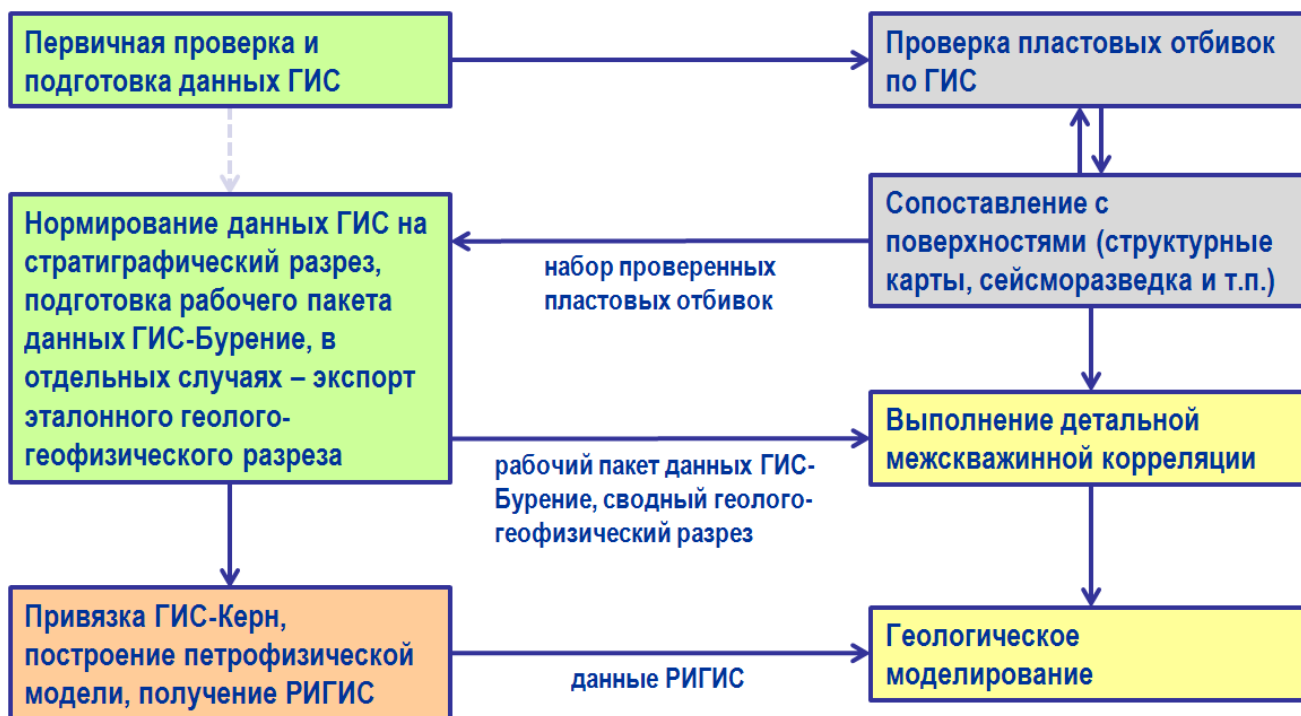


Рисунок 3 – Общая последовательность операций подготовки скважинных данных и петрофизического моделирования ПХГ

Использование предлагаемого подхода имеет комплексный эффект, позволяя повысить эффективность выполнения процедур, относящихся как к этапу геологического моделирования, так и к этапу петрофизического прогноза. Так, приме-

нение рассмотренного подхода позволяет избежать разнородности получаемых результатов петрофизического прогноза, а его ориентированность на работу с поточечными методами прогноза – добиться максимально возможной для имеющихся данных детальности получаемых результатов, избегая искажений, возникающих при работе поинтервальных методов (Рисунок 4).

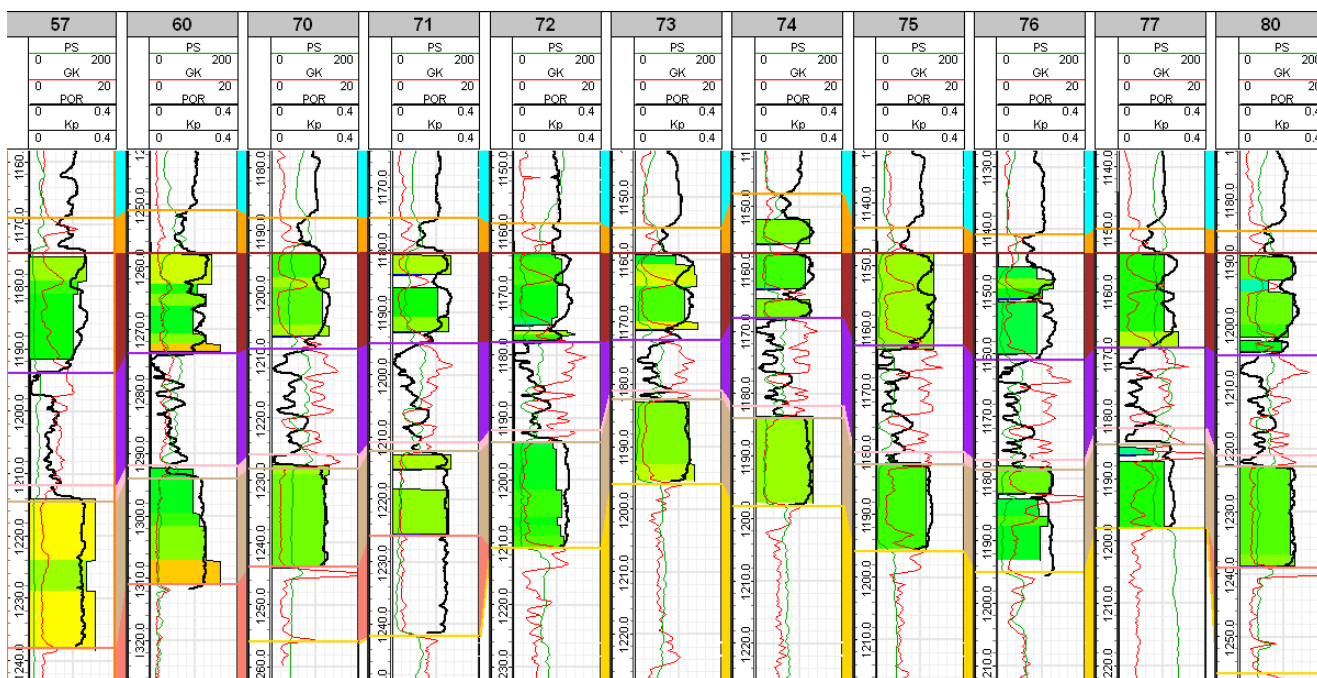


Рисунок 4 – Результаты ручного поинтервального («Kp», с цветовой заливкой) и автоматизированного поточечного («POR») петрофизического прогноза в сопоставлении с данными ГК («GK»), ПС («PS») и отбивками основных геологических границ на примере одного из объектов ПХГ

Поскольку значительная часть инструментов моделирования пространственного распределения свойств, а также инструментов оценки качества выполнения различных процедур моделирования основана на методах количественной оценки, отдельно была рассмотрена корректность их применения в условиях пространственной неоднородности распределения скважинных данных, характерной для ПХГ в водоносных пластах.

Для изучения вопросов корректности работы алгоритмов интерполяции параметров, используемых при картопостроении, фациальном и литологическом моделировании, была произведена их типизация и выполнен комплекс исследований по анализу влияния на различные группы методов существенно неоднородных данных. На разработанных автором математических моделях изучены эффекты, вносимые кластеризацией и цензурированностью исходных данных в работу алгоритмов количественной оценки распределения параметров (Рисунок 5).

Показаны способы снижения влияния негативных эффектов, связанных с неоднородностью распределения исходных скважинных данных, предложен критерий оценки степени кластеризации значений, позволяющий оценить степень однородности пространственного распределения данных и на основе данной оценки

сделать вывод о необходимости применения специальных подходов, снижающих влияние эффектов кластеризации и цензурированности выборки исходных данных. Именно отсутствием в настоящее время в пакетах геологического моделирования процедур такой проверки, и соответственно, доступностью использования любых процедур моделирования для любых данных, даже в ситуациях, когда их использование неприемлемо, обусловлена возможность получения некорректных результатов моделирования даже на полностью корректных исходных данных.

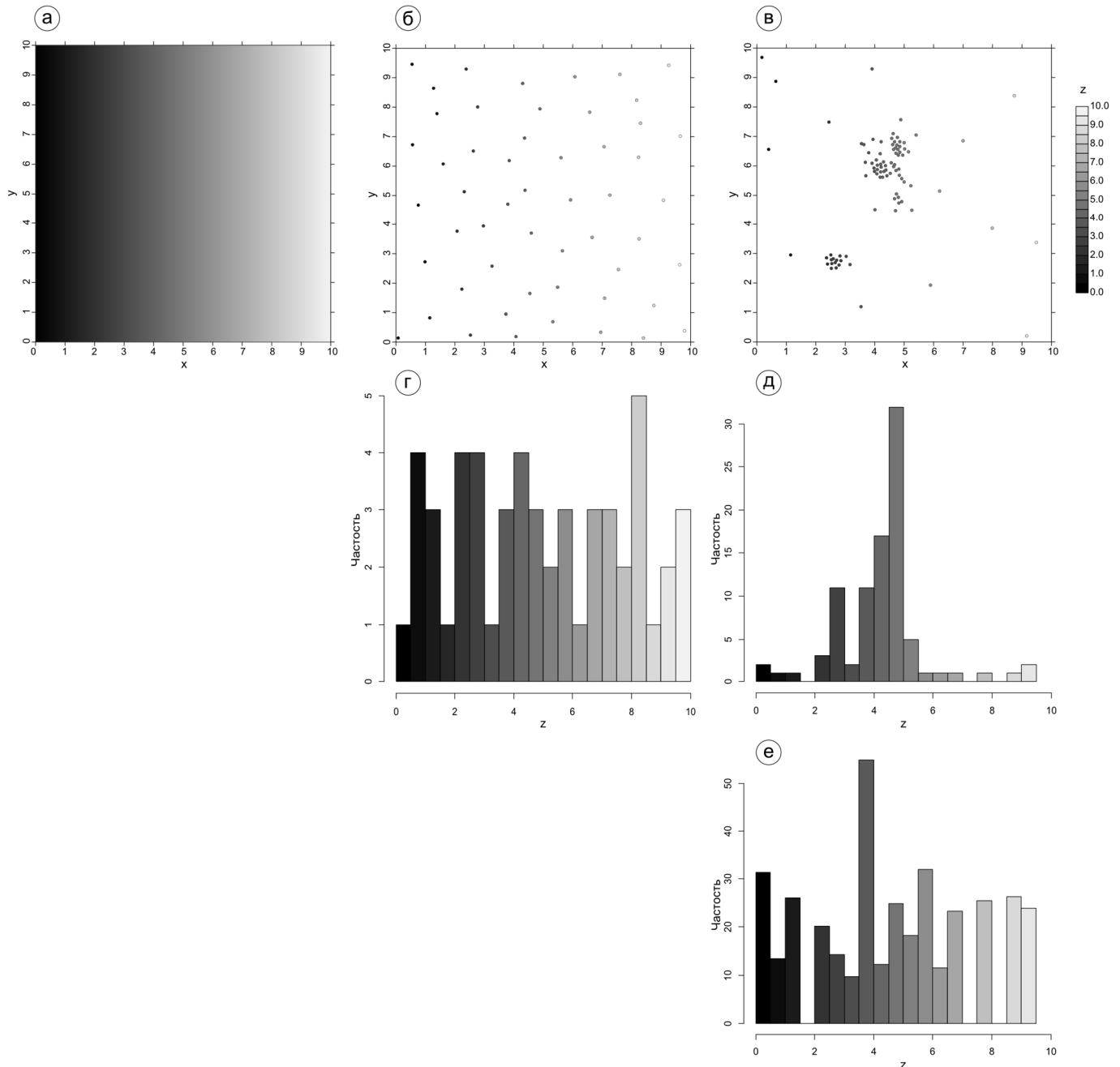


Рисунок 5 – Математическая модель, демонстрирующая влияние неоднородности размещения данных на результат оценки их распределения: а – исходное поле, б – квазиоднородные точки наблюдения и гистограмма распределения полученных значений (г), в – неоднородно расположенные точки наблюдения и гистограмма распределения полученных значений, рассчитанные напрямую (д) и с использованием процедуры декластеризации (е)

В качестве критерия, отражающего степень кластеризации исходных данных, предлагается использовать коэффициент кластеризации k_{cl} , равный интерквартильному размаху площадей полигонов Вороного, построенных с использованием Евклидовой метрики для множества точек, соответствующих координатам устьев скважин, ограниченным выпуклой оболочкой, построенной для всего множества точек:

$$k_{cl} = \text{IQR}(S_N(\text{Conv}(N) \setminus V_P(N)))$$

- где $\text{IQR}(A)$ – интерквартильный размах (InterQuartile Range) множества A , $\text{Conv}(N)$ – 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 , являющиеся мерой информационного вклада отдельных скважин (Рисунок 6).

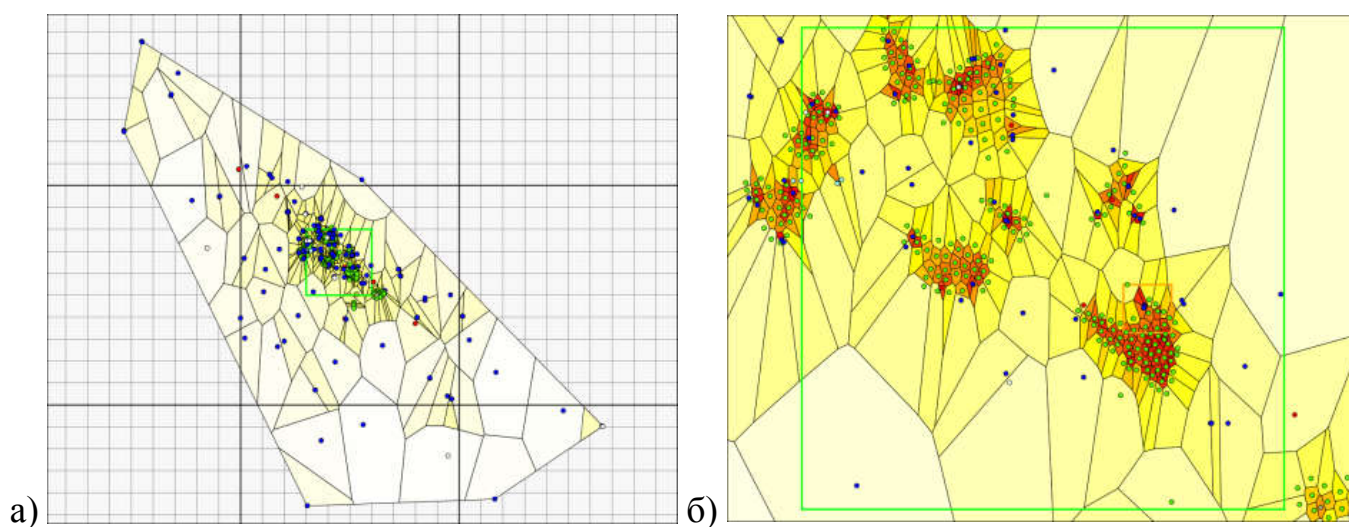


Рисунок 6 – Распределение площадей информационного вклада скважин реального объекта ПХГ в водоносном пласте: а – общий вид, б – десятикратное увеличение центральной части

С точки зрения соответствия баз измерения, для которых производится такая оценка, продемонстрированы эффекты, возникающие в различных случаях применения количественной оценки, научно обоснованы условия корректности её применения. Показаны эффекты, возникающие в случае использования программных продуктов, не поддерживающих применение процедур декластеризации исходных скважинных данных (Рисунок 7). Рассмотрены возможности использования процедур моделирования распределения свойств, чувствительных к неоднородности распределения исходных данных (Рисунок 8). Приведены альтернативные способы количественной оценки достоверности моделирования, пригодные для сопоставления распределений на существенно различающихся базах измерения, например, при ремасштабировании результатов геологического моделирования на сетку с другим охватом и геометрией ячеек, оптимизированную для выполнения гидродинамических расчётов (Рисунок 9).

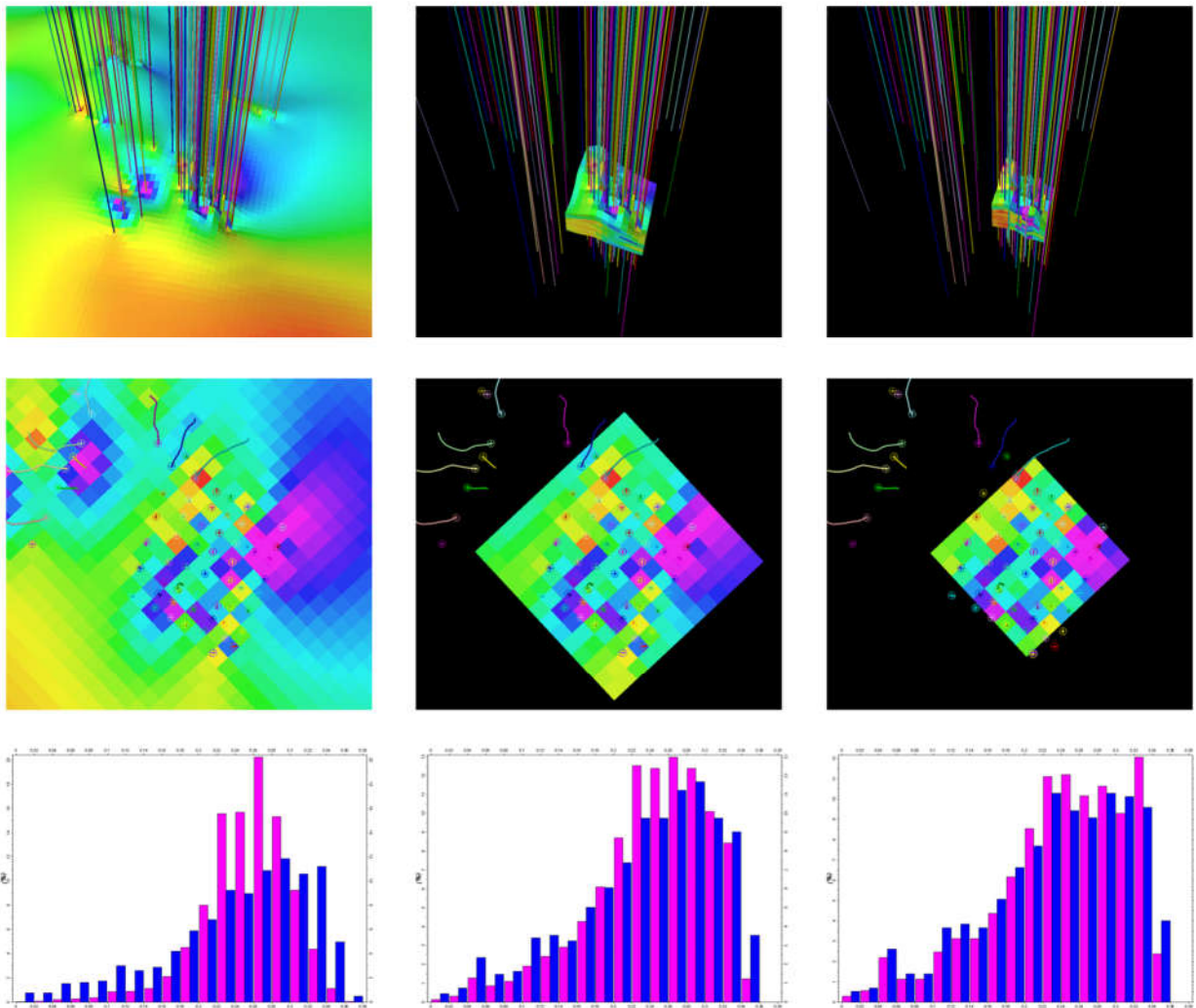


Рисунок 7 – Влияние степени соответствия баз измерения, на которых производится гистограммная оценка без декластеризации, на получаемый результат: а – при существенном различии баз, б - при частичном соответствии баз, в – при близком соответствии баз. Синие столбцы – распределение параметра по скважинным данным, красные – по полученной на их основе модели

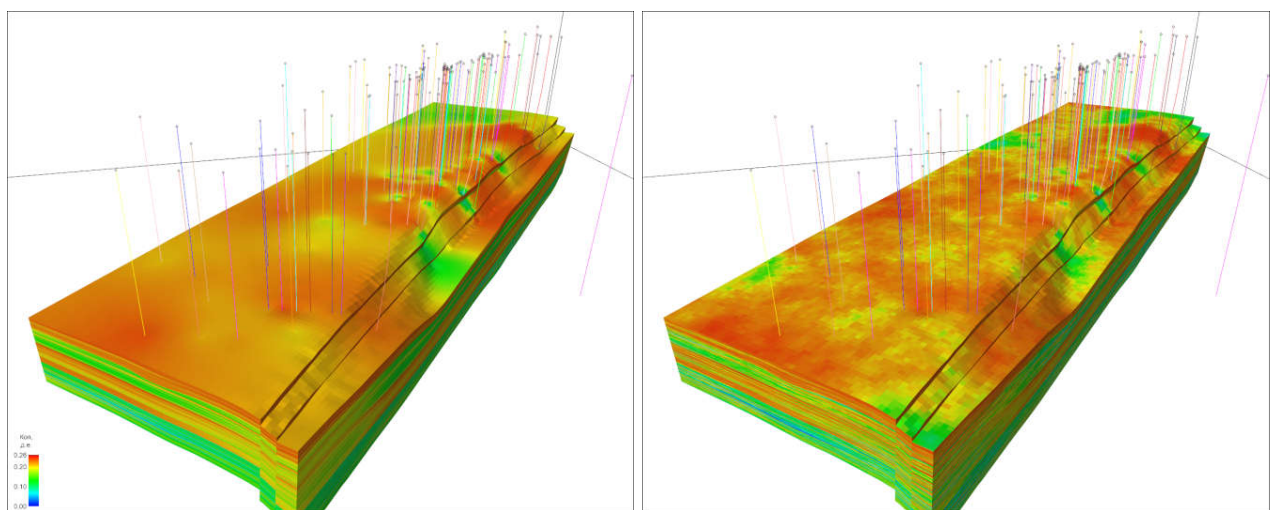


Рисунок 8 – Математическая модель для оценки влияния кластеризации данных на результат моделирования распределения свойств реального объекта ПХГ: а – при использовании детерминированного аглоритма моделирования, б – при использовании стохастического алгоритма с учётом декластеризации данных

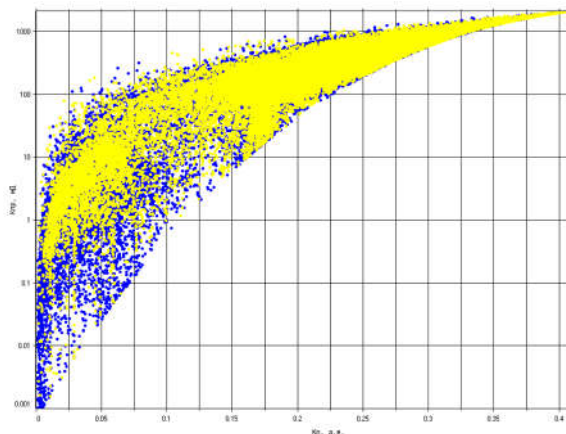
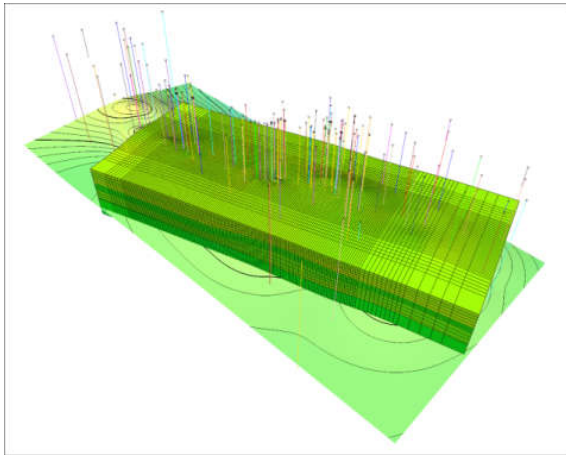
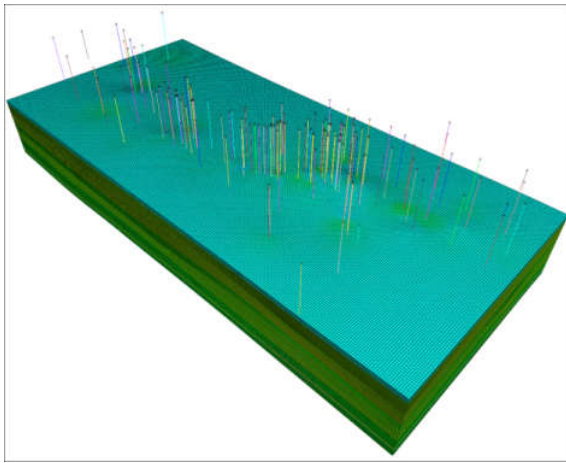


Рисунок 9 – Контроль воспроизведения связи между параметрами на существенно различающихся базах измерения с использованием кросс-плот-анализа

комплексное геолого-геофизическое моделирование ПХГ. Наиболее очевидным подходом к построению такой модели является последовательное построение геологической, а затем, на её основе, геолого-геофизической модели ПХГ. Данный подход позволяет получать как статические модели, отображающие распределение газонасыщенности на некоторую дату, так и динамические, воспроизводящие динамику газонасыщенности за некоторый период времени. Предложены

Итогом главы является систематизация предлагаемых методических решений и программных инструментов, представленная в виде соответствующих таблиц. В первой таблице приведены рассмотренные методические приёмы решения основных специфических проблем геологического моделирования ПХГ в водоносных пластах. Во второй таблице представлена основная функциональность специфических инструментов, необходимых для моделирования ПХГ. Для удобства данная таблица составлена в виде перечня требований к программному продукту геологического моделирования ПХГ, поэтому в дальнейшем без существенной переработки может использоваться при взаимодействии с разработчиками соответствующего ПО.

Четвёртая глава посвящена использованию геофизических данных, накапливаемых в ходе объектного мониторинга эксплуатации ПХГ. Массив скважинных геофизических исследований, производящихся с целью оценки текущей газонасыщенности, наряду с результатами гидродинамического моделирования является одним из основных источников информации о динамике распределения газа в пласте. Поскольку моделирование распределения газонасыщенности или динамики газонасыщенности ПХГ по данным ГИС в обязательном порядке требует учёта данных о геологическом строении объекта и его фильтрационно-емкостных свойствах, данная задача может рассматриваться как

методики комплексного анализа результатов геологического моделирования и геофизических исследований, позволяющие решать задачи анализа динамики газонасыщенности, оценки герметичности объекта хранения и совершенствования системы геофизического контроля ПХГ. В частности, рассмотрена оригинальная методика оценки неопределённости газонасыщенности по данным ГИС-контроль на основе анализа площадного распределения стандартного отклонения линейных запасов газа в пласте по результатам многовариантного расчёта их распределения (Рисунок 10), позволяющая оценивать эффективность существующей системы геофизического контроля ПХГ и давать рекомендации по её совершенствованию.

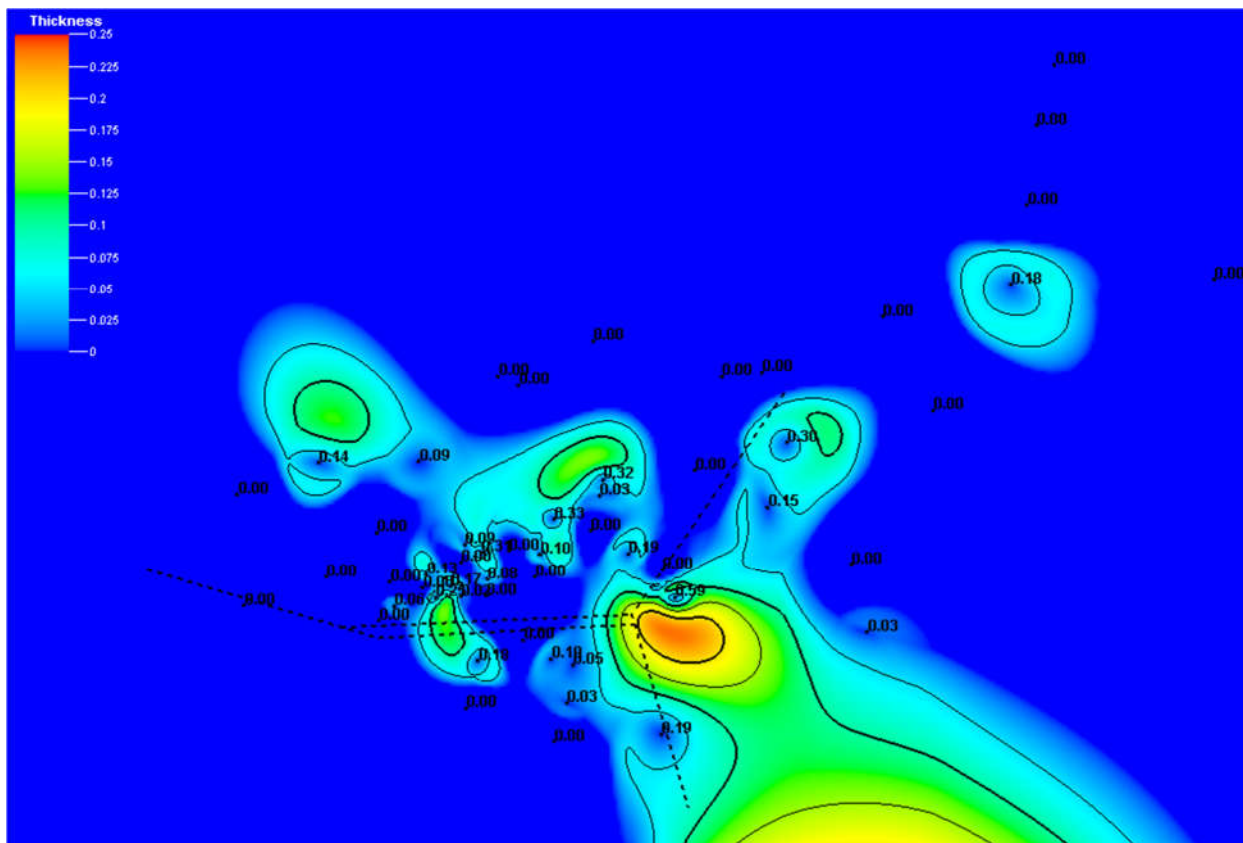


Рисунок 10 – Площадное распределение неопределённости оценки линейных запасов газа в пласте-коллекторе ПХГ по данным ГИС-контроль. Точками обозначены положения скважин, по которым производился исследования, и полученные для них значения линейных запасов газа

Альтернативным способом является единовременное построение комплексной геолого-геофизической модели ПХГ, учитывающей весь объём имеющихся данных по объекту. Приводится теоретическое обоснование возможности построения такой модели на основе методов интерполяционного предсказательного моделирования. Показана принципиальная возможность построения комплексной геолого-геофизической модели ПХГ на основе уже существующих на рынке программных продуктов, в частности, на базе свободных программных продуктов с открытым исходным кодом, использование которых позволяет избежать большинства технологических, экономических и юридических рисков, связанных с использованием закрытого собственного ПО.

Основные выводы и рекомендации

В результате работы были систематизированы специфические аспекты геологического моделирования ПХГ, разработана научно обоснованная методика их геологического моделирования. Показана принципиальная возможность построения корректной геологической модели ПХГ на основе существующих программных продуктов геологического моделирования нефтегазовых месторождений, разработан перечень требований к программному продукту геологического моделирования ПХГ. Предложены принципы построения комплексной геолого-геофизической модели ПХГ, позволяющей одновременно учитывать как геолого-геофизические данные, характеризующие первоначальное геологическое строение ПХГ, так и массив накапливаемых при эксплуатации ПХГ геофизических данных.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Дегтерев А.Ю., Исхаков А.Я., Кан В.Е. Оптимизация алгоритма геологического моделирования подземного хранилища газа в водоносном пласте // Георесурсы. – 2010. – №4 – С.12-16
2. Дегтерёв А.Ю. Проблемы и перспективы использования свободного программного обеспечения (СПО) при решении геолого-геофизических задач // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – №4 – С.55-60
3. Дегтерёв А.Ю. Применимость результатов поинтервального петрофизического прогноза для трёхмерного геологического моделирования // Каротажник. – 2014. – №4 – С.3-22
4. 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
5. Дегтерёв 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. – 2015. – №8. –С.75-79
6. Дегтерёв А.Ю. Геоинформационное сопровождение создания и эксплуатации подземных хранилищ газа // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. - №12. – С.42-50
7. Дегтерёв А.Ю., Кан В.Е. Черников А.Г., Матушкин М.Б. Специфика межскважинной корреляции при геологическом моделировании подземных хранилищ газа в водоносных пластах // Каротажник. – 2016. – №3 (261). – С.67-87

8. 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. – 2016. – №1(25). – С.147-156
9. Дегтерёв А.Ю., Кан В.Е. Актуальные проблемы геологического моделирования подземных хранилищ газа в водоносных пластах // Вести газовой науки. – 2016. – №1(25). – С.157-169

В прочих изданиях:

1. Дегтерёв А.Ю., Исхаков А.Я., Кан В.Е. Разработка методики геологического моделирования ПХГ в водоносном пласте с учётом неравномерности распределения скважинных данных (на примере одного из ПХГ центральной части России) // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2010. – 176с.
2. 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. – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2012. – 201с. – С.78-107
3. Дегтерёв А.Ю. Актуальные методы геологического моделирования ПХГ // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2012. – 162с. - С.112-122
4. Дегтерёв А.Ю. Количественная оценка достоверности геологического моделирования в условиях нестационарности геостатистических характеристик геологической среды // II международная научно-практическая молодежная конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность». – Тезисы докладов. – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2010.
5. 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). – Тезисы докладов. – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2011.
6. 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). – Тезисы докладов. – Москва. – ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – 2013.

Подписано к печати «8» июля 2016 г.

Заказ № 4371

Тираж 120 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,
Ленинский р-н, п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»