

КУДЕЛИН СЕРГЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И
ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ ПОСТРОЕНИЯ СБАЛАНСИРОВАННЫХ
ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И
ГАЗА НА ОСНОВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ**

Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (в нефтяной и газовой промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта – 2012

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики
Ухтинского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор ф.-м. наук, профессор
Кобрунов Александр Иванович

Официальные
оппоненты: Александров Павел Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Ведущий научный сотрудник лаборатории №3
ЦГЭМИ ИФЗ РАН

Кучерявый Василий Иванович,
доктор технических наук,
профессор кафедры сопротивление материалов
и деталей машин УГТУ

Ведущая организация: ООО «СЕВЕРНИПИГАЗ ФИЛИАЛ ВНИИГАЗ»

Защита состоится «27» марта 2012 г. в 13.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.291.03 при ФГБОУ ВПО «Ухтинский
государственный технический университет» по адресу: 169300, г. Ухта,
Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного
технического университета.

Автореферат разослан «22» февраля 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.Г. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Качественное изменение уровня эффективности ГРР и повышение интерпретационных возможностей может быть достигнуто на пути применения методов системного анализа геолого-геофизических данных и системной организации технологий и программного обеспечения создания и поддержки физико-геологических моделей (ФГМ) на основе методов геофизической инверсии. Применение это применение на современном этапе требует качественного улучшения методов моделирования геолого-геофизической среды и интерпретации данных. На данный момент существует множество информационных и моделирующих систем, автоматизирующих и поддерживающих процессы обработки и интерпретации данных геофизических исследований, а также построения геологических моделей среды. Тем не менее, проблема достоверности результатов геофизических исследований и сейчас является актуальной для нефтегазопромысловой геофизики. Это связано как с качеством измерений, исследований и обработки данных, так и с природой обратной задачи геофизики.

Одна из важнейших задач системного подхода в геофизике и геологии — разработка системных принципов анализа комплекса геолого-геофизических данных и организация на их основе технологического и программного обеспечения, поддерживающего интегрированную интерпретацию данных на основе геофизической инверсии. Этому вопросу посвящена данная диссертационная работа.

Цель работы состоит в разработке системных принципов анализа комплекса геолого-геофизических данных и организации на их основе технологического и программного обеспечения, поддерживающего интегрированную интерпретацию данных на основе геофизической инверсии для повышения достоверности построения физико-геологических моделей сложнопостроенных сред.

Основные задачи исследований:

1. выявление и обоснование принципов системной организации структуры физико-геологических данных и методов интерпретации;
2. формулировка принципов системной инверсии и создание технологического обеспечения процедур системной инверсии;
3. разработка принципов системной организации программного обеспечения, поддерживающего интегрированную интерпретацию данных на основе геофизической инверсии;
4. проектирование и реализация основных модулей интегрированной среды физико-геологического моделирования на основе системной инверсии;
5. иллюстрация эффективности разработанной технологии и созданного программного обеспечения на частных примерах и моделях.

Научная новизна:

1. впервые введены принципы системной организации структуры физико-геологических данных и методов интерпретации по степени их интегрированности;
2. разработана информационная модель процессов создания, анализа и поддержки физико-геологических моделей на основе геофизической инверсии;
3. впервые сформулирована задача создания интегрированной среды физико-геологического моделирования на основе системной инверсии и системной

организации моделей.

Основные защищаемые положения состоят в утверждениях, что:

1. системная организация геолого-геофизических данных и системная инверсия позволяют повысить достоверность результатов физико-геологического моделирования сложнопостроенных сред;

2. сформулированные принципы системной организации геолого-геофизических данных и методов, а также принципы системной инверсии могут служить основой для создания интегрированной среды физико-геологического моделирования;

3. разработанная информационная модель и интегрированная система построения физико-геологических моделей позволяют объединить процедуры построения и анализа моделей сложнопостроенных сред на основе геофизической инверсии в комплексный итеративный процесс.

Практическая ценность работы состоит в том, что в результате её выполнения созданы и реализованы алгоритмы аппроксимации геофизических параметров, создано программное обеспечение редактирования, трансформации, взаимной увязки и инверсии физико-геологических моделей с применением эволюционно-динамических принципов. Разработаны основные компоненты интегрированной среды построения сбалансированных физико-геологических моделей на основе решений обратных задач геофизики. Разработанное программное обеспечение позволило выполнить интегрированное моделирование ряда объектов исследований для регионов Карского и Баренцева морей, Тимано-Печорской провинции.

Результаты работы использовались при выполнении научных исследований по программам:

«Научное обоснование и разработка теоретических основ изучения распределенных параметров внутреннего строения геологических объектов по комплексу геофизических данных», Минобразования АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2010, №01.2.00 901904.

«Разработка теории и методов математического моделирования в задачах инверсии геофизических полей с целью прогноза и изучения локальных неоднородностей и внутреннего строения литосферы». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук», 2009-2011.

«Оценка ресурсов и прогнозирование состояния литосферы на основе эволюционно-динамического анализа геолого-геофизической информации». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук», 2000-2012

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на международном семинаре им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Москва 2010 г.), Международная конференция «Итоги Электронного Геофизического Года», материалы конференции (Переславль-Залесский, 2009 г.), международной молодежной конференции

«Севергеозкотех» (Ухта, 2009, 2010, 2011 г.), выставке «Республиканская научная молодежная выставка» (Сыктывкар, 2009 г.), первом молодежном конвенте республики Коми (Ухта, 2011 г.), XIX Губкинских чтениях (Москва, 2011 г.), а также на семинарах по системному анализу и математическому моделированию в науках о Земле в Ухтинском государственном техническом университете.

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 2 статьи в журналах перечня ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 90 наименований, содержит 121 страницу текста, включая 57 рисунков.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору, академику Российской академии естественных наук А. И. Кобрунову за постановку задачи, создание теоретических основ, оказание огромной помощи и постоянный контроль на всех этапах научно-исследовательской работы, а также кандидатам технических наук, доценту С. В. Шиловой, доценту Е. Н. Мотрюк, и доценту Кулешову В. Е. за внимание и помощь в практической реализации научных исследований, кандидату технических наук А. В. Григорьевых за ценные советы и указания, а также официальным оппонентам П. Н. Александрову и В. И. Кучерявому за внимание к работе.

Автор признателен ректору УГТУ, профессору, доктору технических наук Н. Д. Цхадая и зав. кафедрой прикладной математики и информатики, доценту Ю. Г. Смирнову за создание оптимальных условий, понимание и внимание к работе.

Автор также благодарен своему коллеге, аспиранту М. И. Барабанову за сотрудничество и взаимную помощь в подготовке кандидатской диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность тематики диссертационной работы, цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе «Средства системного анализа и физико-геологического моделирования» описываются современные представления о физико-геологических моделях и процессе интерпретации физико-геологических данных, также проведен анализ современных представлений и подходов к системному анализу в геофизике. Автор описывает возможности и характеристики современных методов и продуктов физико-геологического моделирования и свойственные им проблемы.

Информационная модель геофизических исследований представляет собой схему информационной зависимости между изучаемыми объектами, их моделями. Эти взаимозависимости устанавливаются между моделями, объектами разного иерархического уровня. Взаимозависимость между ними установлена геолого-геофизическими связями, уравнениями математической физики и эталонирующими преобразованиями (рис. 1).

Концептуальные модели систем интерпретации геофизических исследований изложены в работах В. Н. Страхова, А. И. Кобрунова, А. А. Никитина.

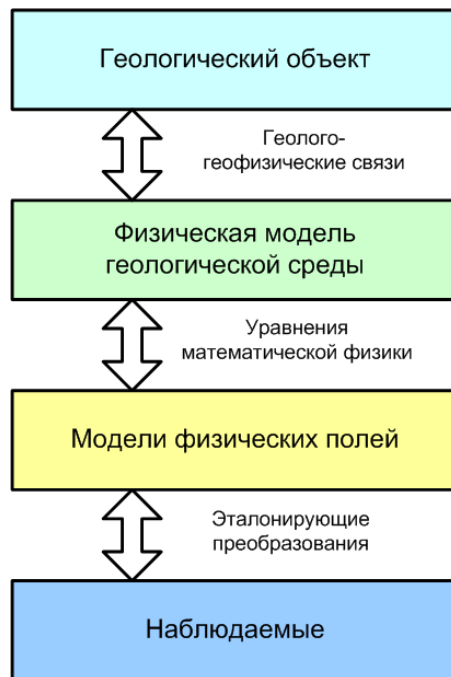


Рис. 1. Общая информационная модель геофизических исследований

В данной части работы на основе анализа работ В. Н. Страхова и А. И. Кобрунова делаются выводы о направлении развития современных методов интерпретации и системного анализа физико-геологической информации.

Современные комплексы программных средств для построения геолого-геофизических моделей в основном имеют модульную структуру и применимы на всех стадиях жизненного цикла месторождения, начиная от детальной разведки и заканчивая извлечением остаточных запасов (рис. 2). Одним из основных требований к современному программному средству моделирования является наличие мощной подсистемы визуализации данных 2D и 3D моделей. Инструменты визуализации обычно являются частью базового модуля и используются другими модулями наряду с общей системой загрузки данных и документацией.



Рис. 2. Структура современного модульного программного комплекса физико-геологического моделирования

В ходе анализа проблематики физико-геологического моделирования и соответствующего программного обеспечения автором было рассмотрено большое количество программных комплексов и систем, обеспечивающих построение, поддержку и анализ моделей месторождений. В этом разделе приводятся описания основных типов модулей (структурного, петрофизического, гидродинамического, литологического, скважинного моделирования, модулей симуляции и интерпретации, а также средства для расширения функциональности), а также краткие описания и характеристики некоторых популярных продуктов. Также представлена сравнительная классификация данных продуктов по основным атрибутам.

Далее автор рассматривает проблематику вышеописанных систем, выделяя основные общие недостатки этих программных комплексов:

- потеря точности описания при моделировании больших систем;
- различные подходы разработчиков ПО к понятию «модели»;
- отсутствие системности описания при построении «всеобъемлющих» моделей месторождений;
- отсутствие возможности оценки погрешностей исходных данных;
- отсутствие теоретического обоснования приемов моделирования;
- детерминированный подход к алгоритмам построения моделей.

На основе изученного материала автор делает вывод о том, что, несмотря на многофункциональность и обширные возможности современных средств анализа, обработки, интерпретации данных геофизических исследований, модели, построенные с их помощью, не лишены недостатков. Точность прогнозов на их основе оставляет желать лучшего. Это связано как с природой обратной задачи, решаемой в ходе интерпретации данных исследований, так и с особенностями подхода к построению сложных систем геомоделирования, а также с несовершенством данных исследований и с частым несоответствием теории интерпретации геофизических данных геофизической практике.

Во второй главе «Системные принципы создания технологии моделирования на основе инверсии» формулируются основные требования к программному комплексу создания и поддержки моделей сложнопостроенных сред. Автор описывает системные принципы анализа геолого-геофизических данных и создания технологии физико-геологического моделирования на основе системной инверсии.

При проектировании технологии физико-геологического моделирования наиболее важным является этап формулирования и отбора ключевых принципов, которые лягут в её основу. Дальнейшее продвижение на пути повышения эффективности геологоразведочных и, в частности, геофизических работ связано с переходом к методам совместного анализа геолого-геофизических данных. Это хорошо известное утверждение, справедливость которого связана с характерной для современного этапа развития геофизики стадией исчерпания интерпретационных возможностей моно-методов. Совместный анализ разнородных геолого-геофизических данных сводится, чаще всего, к их сопоставлению, качественному описанию, применению вероятностно-статистических методов и методов распознавания образов для формирования заключений о характере распределения вероятностных законов для изучаемых признаков и прогнозе области их возможных значений. Это важный этап системного анализа геолого-геофизических данных, задачи которого состоят в

установлении общих закономерностей и выявлении содержательных взаимосвязей, сообщающих о строении изучаемого объекта. Но, тем не менее, методы системного анализа данных сами по себе не обеспечивают построения компонент содержательных взаимоувязанных физико-геологических моделей изучаемых сред, допускающих проверку моделированием и, тем самым, контроль достоверности построений. Это прерогатива иных методов, методов инверсии, обеспечивающих построения системы содержательных взаимоувязанных физико-геологических моделей изучаемых сред. Таким образом, конечная цель системного анализа геолого-геофизических данных — построение содержательных взаимоувязанных физико-геологических моделей изучаемых сред — достигается за два этапа. Во-первых, за счет системного анализа данных и их подготовки к использованию в последующих процедурах инверсии, а во-вторых, на этапе выполнения собственно системной инверсии.

Задача построения системы содержательных взаимоувязанных физико-геологических моделей изучаемых сред по комплексу геолого-геофизических данных, допускающих проверку моделированием и, тем самым, контроль меры достоверности построений, представляет собой основную конечную задачу системного анализа геолого-геофизических данных. Она распадается на подзадачи системного анализа данных и системную инверсию. Разработка математической модели системного анализа геолого-геофизических данных представляет собой следующий этап развития интерпретационного обеспечения и основу для создания технологии интегрированной интерпретации, имеющей под собой системное обоснование.

Технология создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды призвана обеспечить комплексное моделирование и создание интегрированных физико-геологических моделей. Этот инструмент позволит применить современные алгоритмы обработки данных полевых и скважинных исследований, а также объединить функциональность ряда программных продуктов, разработанных в том числе и в Ухтинском государственном техническом университете, в едином программном комплексе. На данный момент для решения подобных задач в УГТУ используется набор независимых программ. Создание комплекса, объединенного общей базой данных, обеспечит полноценное плоское и трехмерное физико-геологическое моделирование месторождений углеводородов без издержек на конвертирование и передачу данных, а также позволит проводить интерпретацию геофизических данных.

Технология моделирования физико-геологических сред должна не только включать в себя программные компоненты, обеспечивающие построение физико-геологических моделей и решение прямых и обратных задач, но и содержать подробное описание приемов и методов моделирования, основанных на системе принципов создания, поддержки и инверсии физико-геологических моделей. В данной главе диссертационной работы описаны и обоснованы основные требования, предъявленные к разрабатываемой технологии на этапе проектирования:

- Общее хранилище физико-геологических данных.
- Импорт и экспорт физико-геологических данных.
- Редактирование и трансформация моделей.
- Решение прямых задач геофизических методов.

— Создание комплексной физико-геологической модели и поддержка её актуальности.

— Применение эволюционно-динамических принципов для решения обратных задач геофизики.

— Интерполяция данных на основе геофизической инверсии.

— 2D и 3D визуализация моделей физико-геологической среды.

Основные принципы системного анализа геолого-геофизических данных, использованные при проектировании и разработке технологии создания и поддержки физико-геологических моделей на основе инверсии, были сформулированы и кратко изложены А. И. Кобруновым в его статье «Математические основы системного анализа геолого-геофизических данных». Они состоят в следующем:

1) Изучаемый геологический объект есть система взаимоувязанных компонент физико-геологической модели среды (ФГМ). Компоненты ФГМ рассматриваются как образы геологического объекта при его проектировании на пространства ФГМ. Единство образа у различных компонент ФГМ означает существование эффектов подобия различных компонент, выражаемых, в частности, связями между их параметрами.

2) Наблюдаемые компоненты геофизических данных моделируются по содержательным компонентам физико-геологической модели алгоритмически реализуемым, в частности, аналитически определенными зависимостями.

3) Компоненты ФГМ объединены установлением физико-геологических связей между их параметризациями, отражающими факт отнесения компонент ФГМ к одному геологическому объекту.

4) Реконструкция компонент ФГМ осуществляется на основе системной инверсии геофизических данных, обеспечивающей отбор моделей из класса допустимых по доступной системе наблюдаемых при выполнении установленных физико-геологических связей между параметрами внутри моделей и компонентами ФГМ.

Системный анализ геолого-геофизических данных предвосхищает процедуру системной инверсии и обеспечивает ее необходимыми компонентами. В задачу системного анализа входит:

1) Определение состава рассматриваемых ФГМ. В перечень компонентов физико-геологических моделей, включаемых в рассмотрение входят:

— группа геологических моделей $G_i(T_i), i = 1 \div N_G$;

— группа физических моделей $\Psi_i(M_i), i = 1 \div N_\Psi$.

N_G, N_Ψ — число вводимых геологических и физических моделей, T_i, M_i параметры характеризующие конкретные элементы этих моделей, например, если Ψ_i, G_i функции пространственных координат или их аппроксимации заданными

множествами, то M_i, G_i параметры, заданием которых конкретизируется элемент из Ψ_i, G_i .

2) Определение связей между параметрами внутри содержательной модели и компонентами других физико-геологических моделей. Предметом системного анализа не может служить компонента ФГМ с отсутствующими связями ее параметризации с компонентами других ФГМ.

В диссертационной работе данные задачи системного анализа данных подробно описаны и разделены на подзадачи.

Принципы и процедурная составляющая системной инверсии. Согласно А. И. Кобрунову, синтез физико-геологической модели – задача системной инверсии. Синтез ФГМ это реконструкция физико-геологической модели на основе заданных наблюдаемых и связей между элементами системы. Системный принцип реконструкции состоит в учете взаимосвязи между элементами ФГМ и ее связью с геологической моделью в процессе инверсии. Реконструкция конкретного элемента ФГМ по соответствующему отдельно взятому физическому полю не является реализацией системного принципа. Системный подход состоит в рассмотрении и учете в процессе инверсии всех доступных связей между компонентами ФГМ.

Метод системной инверсии. Под этим термином понимаются непротиворечивая и достаточно полная формулировка на математическом языке задачи синтеза модели системы – реконструкции параметров входящих в системную физико-геологическую модель среды по известным наблюдаемым эффектам и сформулированным законам для характерных процессов, либо параметров процессов, обусловивших заданные наблюдаемые при известных представлениях о ФГМ.

Запишем перечень уравнений, определяющих структуру задачи системной инверсии с указанием параметризации для выбранных компонент ФГМ.

$$\mathbf{A}[\boldsymbol{\sigma}_\Psi] = \mathbf{u}_\Psi : A_i[\sigma_i] = u_i, i = 1 \div N_\Psi \quad (\text{a})$$

$$\boldsymbol{\sigma}_\Psi = \{ \sigma_i = \sigma_{\Psi_i} \in \Psi_i(M_i), i = 1 \div N_\Psi \}. \quad (\text{б})$$

$$\Xi_j[\boldsymbol{\sigma}_\Psi, \mathbf{g}_G] = 0 \quad (\text{в})$$

$$j = 1, \dots, N_\Xi.$$

$$\mathbf{g}_G = \{ g_i = g_{G_i} \in G_i(T_i), i = 1 \div N_G \} \quad (\text{г}) \quad (1)$$

$$J[\boldsymbol{\sigma}_\Psi, \mathbf{g}_G] \rightarrow \min. \quad (\text{д})$$

$$D_j[\boldsymbol{\sigma}_\Psi, \mathbf{g}_G, \mathbf{d}]; \quad (\text{e})$$

$$j = 1, \dots, N_D.$$

, где (а) — уравнения математической физики, связывающие параметры физических компонент моделей $\boldsymbol{\sigma}_\Psi$ и соответствующие физические поля $\mathbf{u}_\Psi = \{ u_{\Psi_i} = u_i, i = 1 \div N_\Psi \}$,

(б) — условие принадлежности модели определенному классу;

(в) — связи компонентов модели (функциональные зависимости, корреляционно-регрессионные зависимости, нечеткие отношения);

(г) — условие принадлежности связи определенному типу;

(д) — функционал, задающий критерии подобия (критерий оптимальности);

(е) — набор эволюционно-динамических уравнений.

Отличие между (в) и (е) состоит в том, что (в) — алгоритмически определенный закон, в соответствии с которым по заданному состоянию одних элементов ФГМ можно сузить, а в исключительных случаях сильно сузить класс допустимых моделей для других компонентов ФГМ, в то время как (е) — уравнение развития компонент ФГМ модели во времени, начиная с некоторого состояния до современного положения. Развитие происходит в соответствии со значениями геодинамических параметров d , общих для всех компонент ФГМ, входящих в систему геодинамических уравнений. Общность этого параметра и есть то, что объединяет различные компоненты ФГМ в систему взаимоувязанных единым генезисом объектов.

В данном разделе работы также рассмотрены конкретные случаи пересечения множеств возможных решений и выбранного класса моделей и методы разрешения возникающих противоречий с помощью квазирешений и методов оптимизации.

В третьей главе данной работы «**Системная организация интегрированной среды физико-геологического моделирования сложнопостроенных сред**» автор описывает сформированную в ходе исследования концепцию интегрированной среды моделирования на основе системной инверсии. Описаны методы хранения и передачи данных в разрабатываемой среде, модули и функциональные возможности программного комплекса создания и поддержки трехмерных физико-геологических моделей «GeoVIP», являющийся основным программным компонентом интегрированной среды. Также в данной главе работы описан численный подход к процедуре системной инверсии на основе эволюционно-динамических принципов — двухэтапная итерационная схема инверсии двумерных структурно-параметризованных моделей, а также созданное программное обеспечение итерационной инверсии.

Разрабатываемая интегрированная среда физико-геологического моделирования призвана обеспечить создание и актуализацию сбалансированных физико-геологических моделей. Обычно для интер- и экстраполяции данных в подобных средах и программных комплексах используются стохастические алгоритмы, не учитывающие априорные геологические данные и геофизические поля. Одна из важнейших задач данной разработки — создание алгоритмического и программного обеспечения, позволяющего выполнять взаимную увязку и аппроксимацию интегрированных моделей на основе геофизической инверсии. Разрабатываемая среда также должна удовлетворять основным требованиям, представленным к технологии создания физико-геологических моделей в предыдущей главе работы. Структура создаваемой интегрированной среды изображена на рисунке 5. Файловое хранилище данных содержит опорные данные для проведения анализа и построения содержательных физико-геологических моделей. Двумерные данные структурированы по профилям, этот раздел содержит файлы с геометрией и параметрами плоских моделей разрезов, а также геофизическими полями (форматы ASCII, dat, bin, GCIS-

текст и пр.), данные скважинных исследований (ASCII, las, dat, xls) и прочие данные, необходимые для обеспечения рабочего процесса. Трёхмерные данные структурированы по площадям и включают карты профилей (bin), трёхмерные структурные сетки, распределения параметров и пространственные геофизические поля (grd, dat).

Набор прикладных программ 2D моделирования служит для создания, анализа и уточнения двумерных физико-геологических моделей и покрывает различные содержательные задачи геофизики. Трёхмерное моделирование производится с помощью программного редактора физико-геологических моделей GeoVIP. Функциональность редактора GeoVIP подробно описана в данной главе.

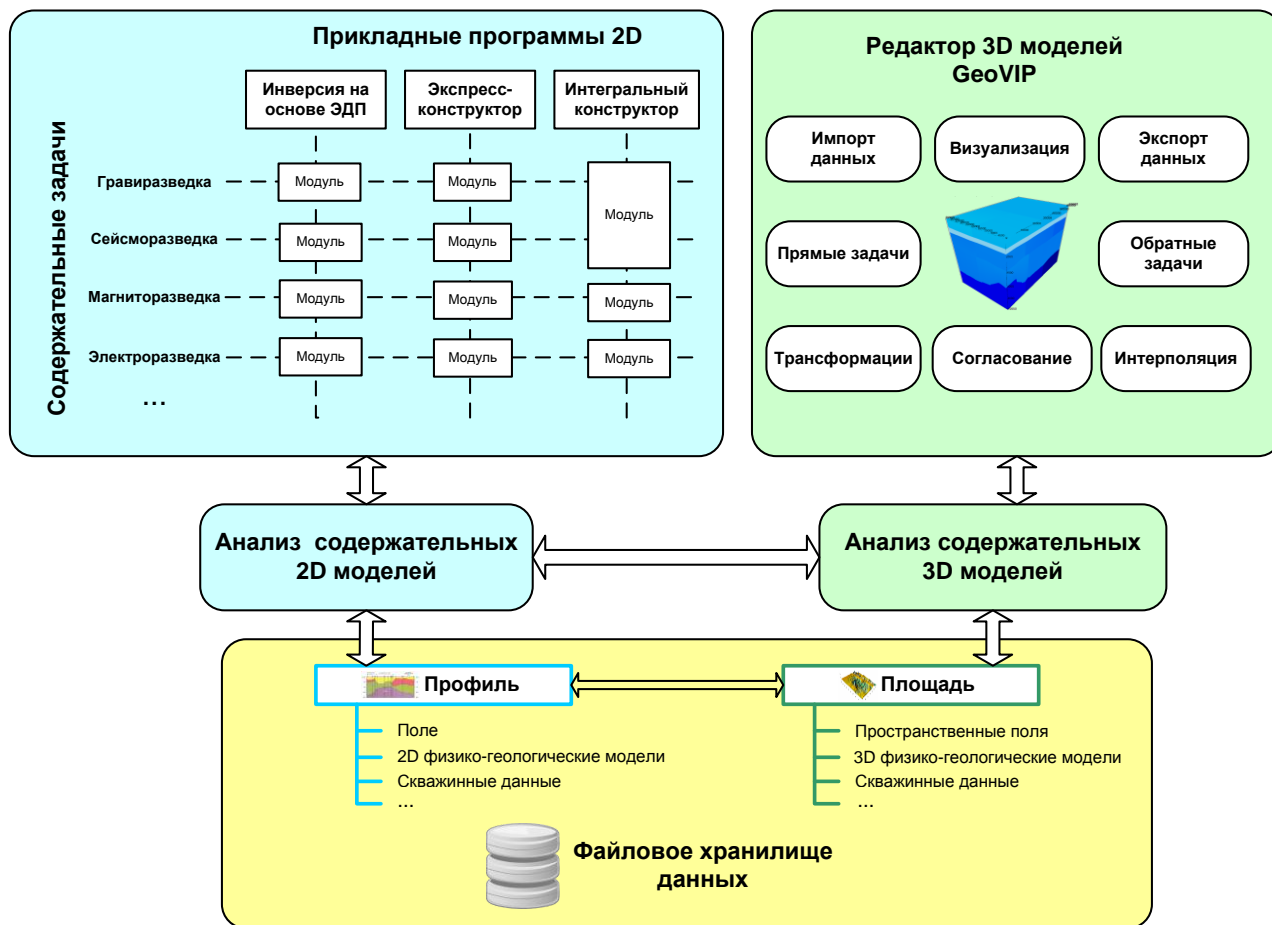


Рис. 5. Схема интегрированной среды физико-геологического моделирования.

Основным источником опорных данных для построения двумерных моделей профилей и трехмерных моделей месторождений служат специализированные файлы, содержащие результаты скважинных и полевых геофизических исследований и параметры моделей, построенные на предыдущих этапах работ при помощи различных программных средств и инженерных пакетов. Поскольку существует необходимость хранения исходных данных и результирующих моделей на разных этапах построения и трансформации, было решено использовать общее структурированное файловое хранилище данных.

Основой программного редактора GeoVIP служит реляционная база данных для хранения иерархии исследований, результатов исследований, расчетов и параметров моделей. Для поддержки базы данных используется СУБД Microsoft SQL Server 2008

Express Edition, обеспечивающая целостность, доступность и резервирование данных. Данные могут быть импортированы из других систем и экспортированы в многочисленные форматы, при этом база данных является общим хранилищем, на основе которого строится комплексная модель геолого-геофизической среды. Комплекс «GeoVIP» представляет собой набор функциональных модулей, взаимосвязанных на уровне базы данных и общей программной оболочки (рис. 7). Ниже кратко описаны возможности и особенности основных модулей комплекса.

Структурно-плотностное моделирование. В рамках данного модуля реализованы инструменты ввода данных и параметров моделей, обработки и визуализации для структурных геолого-геофизических моделей сред (рис. 8).

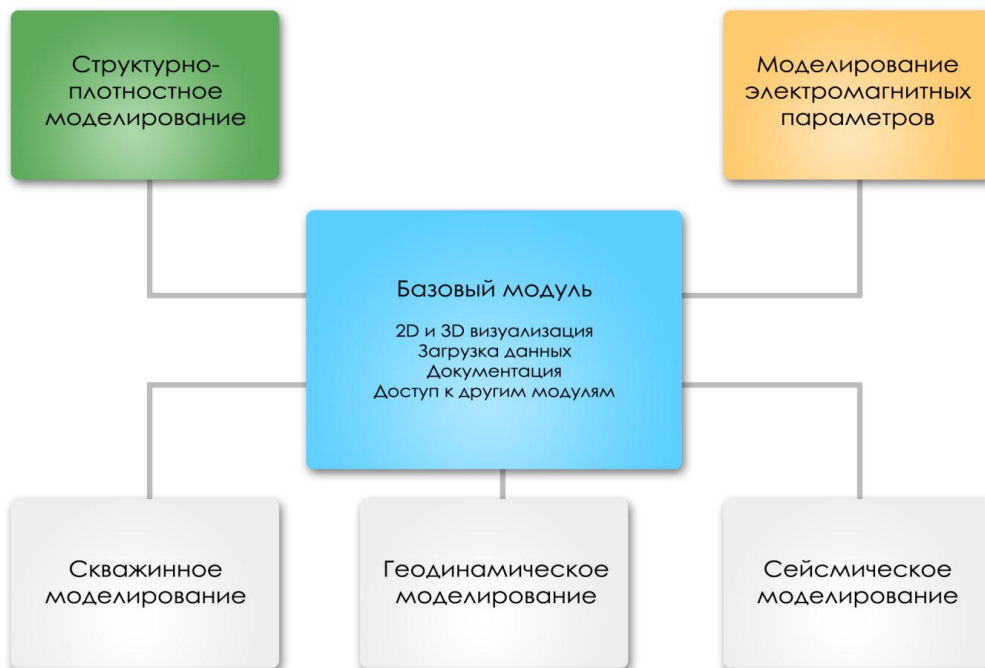


Рис. 7. Модули программного комплекса «GeoVIP».

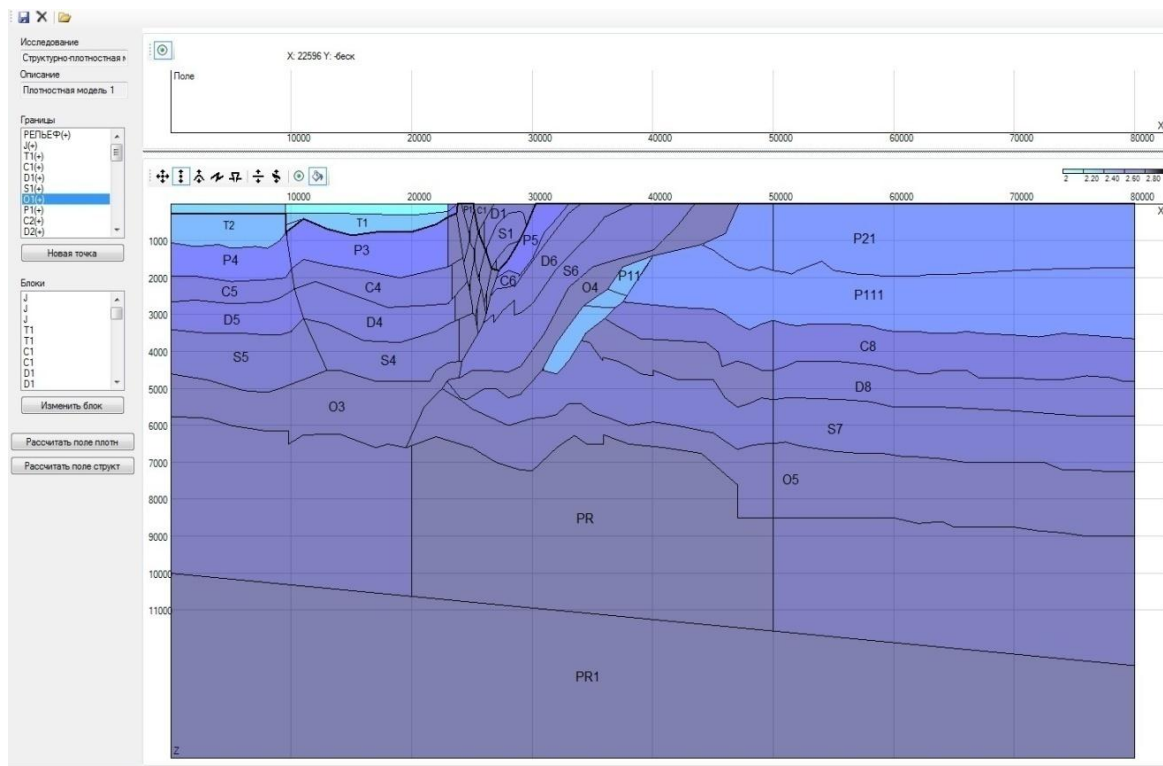


Рис. 8. Визуализация 2D профиля в GeoVIP на примере гряды Чернышева — структурно-плотностная модель с обозначениями горизонтов.

В комплекс также включена возможность отображения и редактирования трёхмерных структурно-плотностные модели исследуемых объектов, а также других моделей с распределенными параметрами. Реализован гибкий механизм отображения объектов, без постоянных затрат времени на создание и пересчёт трёхмерных объектов. Реализованы механизмы масштабирования объектов и вращения камеры, инструменты наложения структурных и равномерных сеток, а также возможность «взгляда внутрь пласта» (рис. 12).

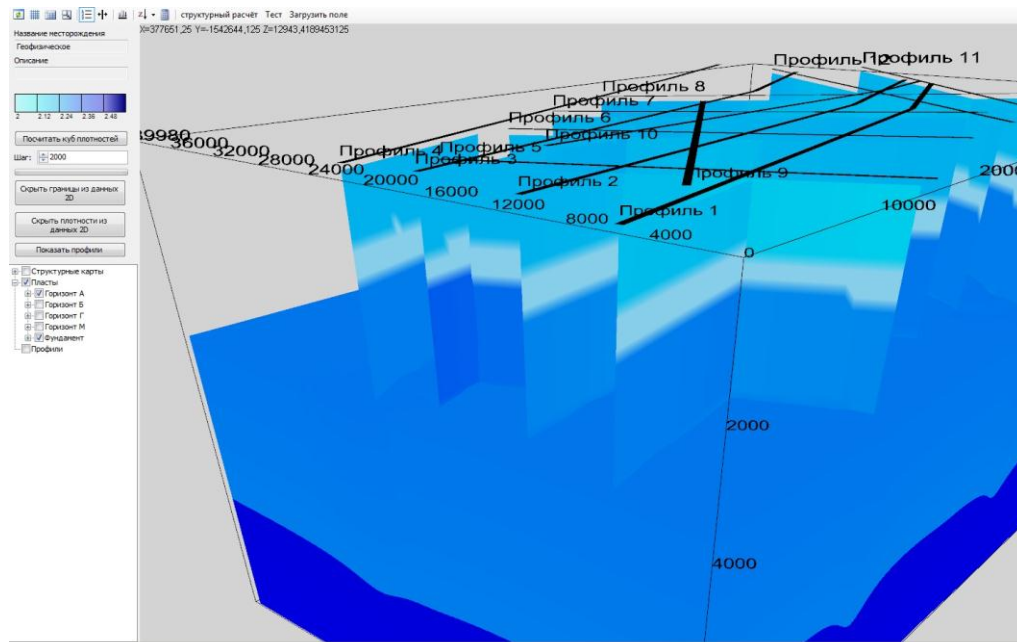


Рис. 12. Трёхмерная визуализация аномальной зоны распределения плотностей в пределах Геофизического месторождения.

Также в рамках данного модуля разработаны и включены в программный комплекс алгоритмы интерполяции структурных границ и распределения параметра для трехмерной модели из двумерных данных (интерполяция по профилям) и процедуры согласования структурно-плотностной модели. Результатом их применения являются согласованные модели изучаемых объектов, учитывающие как результаты плоского моделирования разрезов, так и результаты геофизической инверсии для трехмерного случая.

Электрометрическое моделирование. Модуль электрометрического моделирования позволяет создавать и редактировать модели изучаемых объектов с распределенными параметрами проводимости. Модуль позволяет рассчитывать тензоры магнитотеллурического импеданса для таких моделей. В редакторе применены алгоритмы расчета и метод построения электрометрической модели, разработанные сотрудником УГТУ Геннадием Жарким. Разработанная им библиотека алгоритмов также позволяет рассчитывать производную Фреше для моделей с распределенными электрометрическими параметрами и решать обратную задачу магнитотеллурического зондирования в критериальной постановке.

Геодинамическое моделирование. Модуль структурного-плотностного моделирования также дополняют инструменты моделирования сложных геологических

структур в соответствии с эволюционно-динамическими принципами. Они представляют собой модификаторы, применяемы к структурным границам модели с целью изменить её геометрию согласно некоторому физическому закону (рис. 14). Более подробно технология математического моделирования эволюционно-динамических задач для сложнопостроенных сред описана в подразделе «Анализ и разработка алгоритмов динамического моделирования».

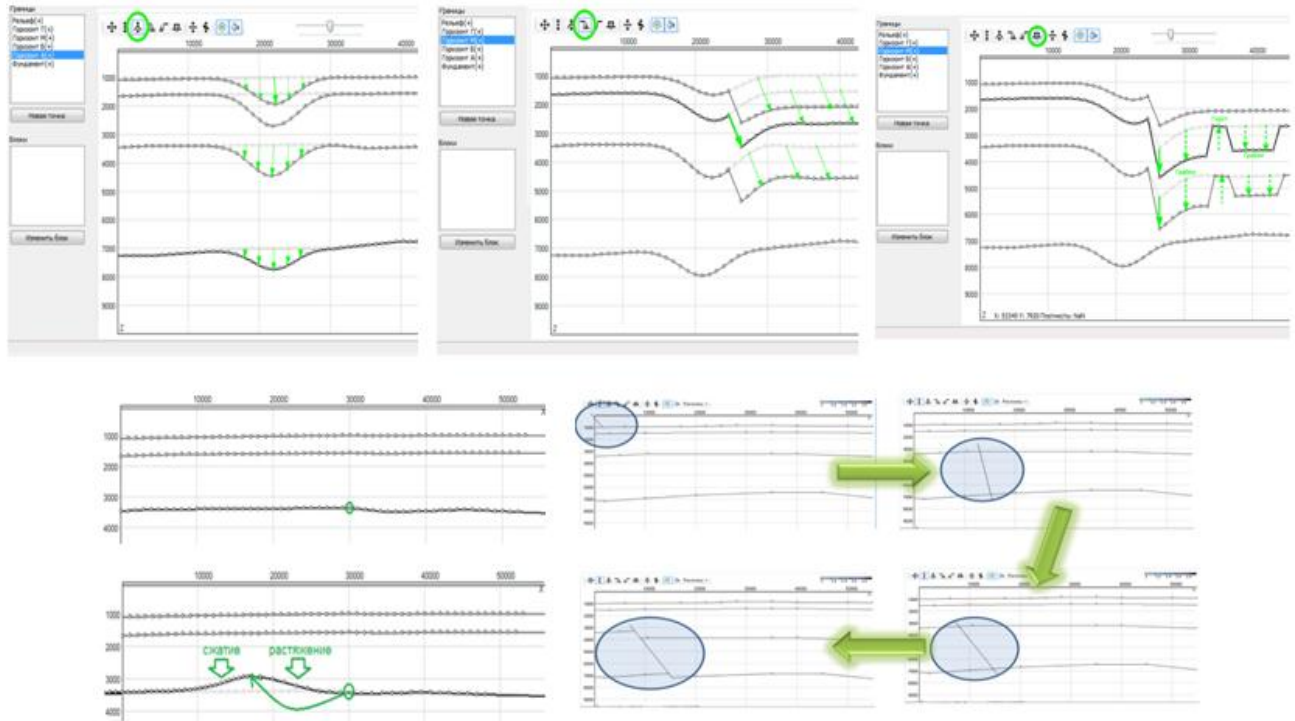


Рис. 13. Действие геодинамических модификаторов в GeoVIP

Скважинное моделирование. В разработанный программный комплекс GeoVIP включен функциональный модуль редактирования и визуализации скважинной информации. Он позволяет загружать, редактировать и отображать информацию по траекториям скважин и распределению физических параметров вдоль ствола скважины (рис. 15). Предусмотрены механизмы согласования трехмерного распределения параметров с распределением вдоль ствола скважины.

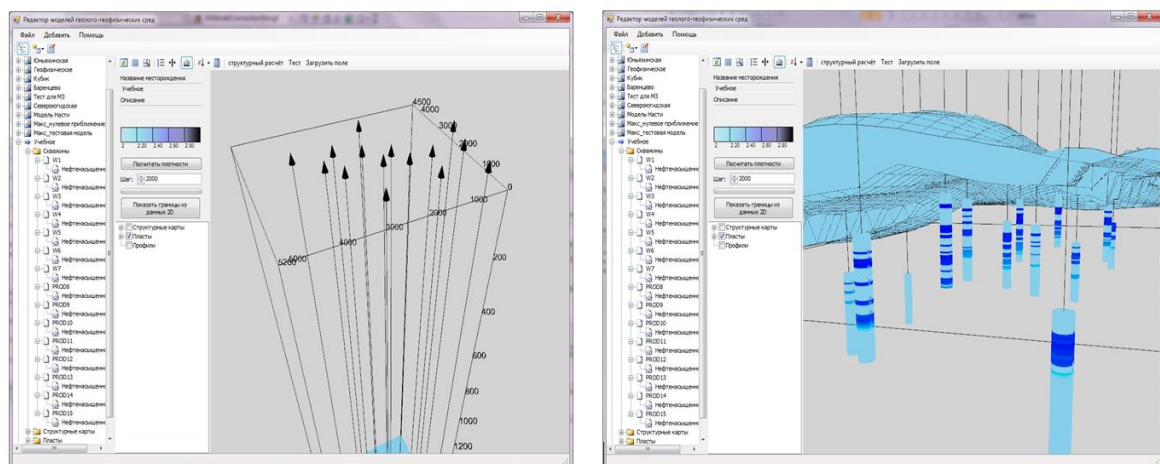


Рис. 15. Трёхмерная визуализация траекторий скважин и распределения параметра нефтенасыщенности.

Архитектура и идеология программного комплекса **GeoVIP** нацелены на дальнейшее его наполнение инструментами физико-геологического моделирования, а также модулями решения содержательных задач геофизики.

При моделировании сложнопостроенных сред, характеризующихся распределенными параметрами, мы неизбежно сталкиваемся с рядом проблем, порожденных эффектами эквивалентности. Для их преодоления в рамках исследовательских работ коллектива был разработан критериальный принцип введения априорной информации относительно параметров модели среды и его обобщение — *эволюционно-динамический принцип (ЭДП)*. Теоретическую основу составило исследование и использование свойств экстремальных классов как многообразия решений уравнений Эйлера для соответствующей вариационной задачи.

В данной части работы описывается постановка задачи **инверсии структурно-параметризованных моделей на основе ЭДП**. В общем виде Можно записать эту задачу следующим образом:

$$\Xi(t, \sigma(v), \mathbf{v}(v), \dots, \mathbf{q}(v)) = 0 \quad (\text{a})$$

$$\sigma^*(v) = \sigma(t_0, v) \quad (\text{b}) \quad (1)$$

$$A[\sigma(t_k, v)] = u(s_0) \quad (\text{c}), \text{ где}$$

(a) — уравнения движения, $\mathbf{v}(v), \dots, \mathbf{q}(v)$ — компоненты движения;

(b) — нулевое приближение как модель в начальный момент времени t_0 ;

(c) — условие результирующего физического поля;

Напомним, что приняты обозначения для координат:

$$v = (x, y, z) = (x_i, i = 1 \div 3); \quad \mathbf{x} = [t, v]; \quad s = (x, y);$$

Эта задача будет иметь смысл, если параметры v, \dots, q заданы с неопределенностью, допускающей множественность решения уравнения (1-a) и их доопределение (также возможно не исчерпывающее) исходя из $A[\sigma(t_k, v)] = u(s_0)$. Но и так сформулированная задача еще может быть недоопределенной, если произвол в выборе v, \dots, q чрезмерно велик. В этом случае, в соответствии со сформулированными критериальными принципами доопределения задач инверсии в условиях неопределенности, введем дополнительный критерий отбора $J[\sigma(t_k, v)]$, так что задача (1) дополнится еще одним требованием:

$$J[\sigma(t_k, v)] \rightarrow \min \quad (1-d)$$

Рассмотрим двухэтапную схему вычислений, в которой на первом этапе выполняется компенсация невязки за счет сдвиговых деформаций:

$$f^{i+1}(s) = f^i(s - \mathbf{V}^i[\alpha_s^i, s, \varphi^i(s)]); \quad (\text{a})$$

$$f(t_0, s)|_{t=0} = f^0(s) = f^*(s); \quad (\text{b})$$

$$\varphi^i(s) = [u(s_0) - A[f^i(s)]]_{\mathbb{I}_{s_0 \rightarrow s}} \quad (\text{c}), \text{ где}$$

(a) — итерационное уравнение сдвига границ, $V^i[a_s^i, s, \varphi^i(s)]$ — оператор сдвига, определяющий величину смещения точки $s : s \rightarrow s - \Delta(s)$;

(b) — модель в некоторый начальный момент времени t_0 ;

(c) — условие результирующего поля.

После достижения предела выполняется второй этап, состоящий в компенсации дивергентной компоненты. Последняя, по своей сути, совпадает с процедурами построения решения на экстремальных классах.

$$f^{i+1}(s) = f^i(s) + \alpha_q^i \cdot W^i[f^i(s), \varphi^i(s)]; \quad (a)$$

$$f^0(s) = f^*(s); \quad (b)$$

$$\varphi^i(s) = [u(s_0) - A[f^i(s)]]_{s_0 \rightarrow s} \quad (c), \text{ где}$$

(a) — итерационное уравнение сдвига границ $W^i[f^i(s), \varphi^i(s)]$ — оператор дивергенции, определяющий поправку, которую надо добавить к $f^i(s)$ вместе с множителем α_q^i , чтобы получить $f^{i+1}(s)$;

(b) и (c) — аналогичны этапу сдвиговых деформаций.

Реализация итерационного алгоритма. Алгоритмы этапов сдвиговых деформаций (первого этапа инверсии) и дивергенции (второго этапа), а также алгоритмы численного расчета производной параметра и поиска коэффициента релаксации представлены в работе (рис. 16).

Алгоритм был реализован на языке C# в виде отдельной прикладной программы **EvDynInversion**, позволяющей загружать двумерные структурно-параметризованные модели сред и геофизических полей и использовать модуль системной инверсии на основе эволюционно-динамических принципов для их последующей трансформации согласно выбранным этапам. Проведенные эксперименты с тестовыми моделями и их результаты подробно описаны в работе. Можно сделать вывод о том, что двухэтапная схема инверсии, построенная на эволюционно-динамических принципах, позволяет получить решение обратной задачи гравиметрии при наличии некоторых априорных сведений о среде, учитывающихся в виде матриц операторов сдвига и дивергенции, а также в порядке применения трансформаций.

Испытания алгоритма системной инверсии на основе эволюционно-динамических принципов показывают, что двухэтапная итерационная схема позволяет получать содержательные двумерные структурно-параметризованные и сеточные модели среды. Разработанный программный модуль также позволяет создавать произвольные расчетные схемы и наращивать количество видов трансформаций модели. Поскольку метод решения прямой задачи является одним из входных параметров расчета, алгоритм является достаточно универсальным, чтобы с небольшими корректировками использовать его для инверсии различных содержательных задач геофизики.

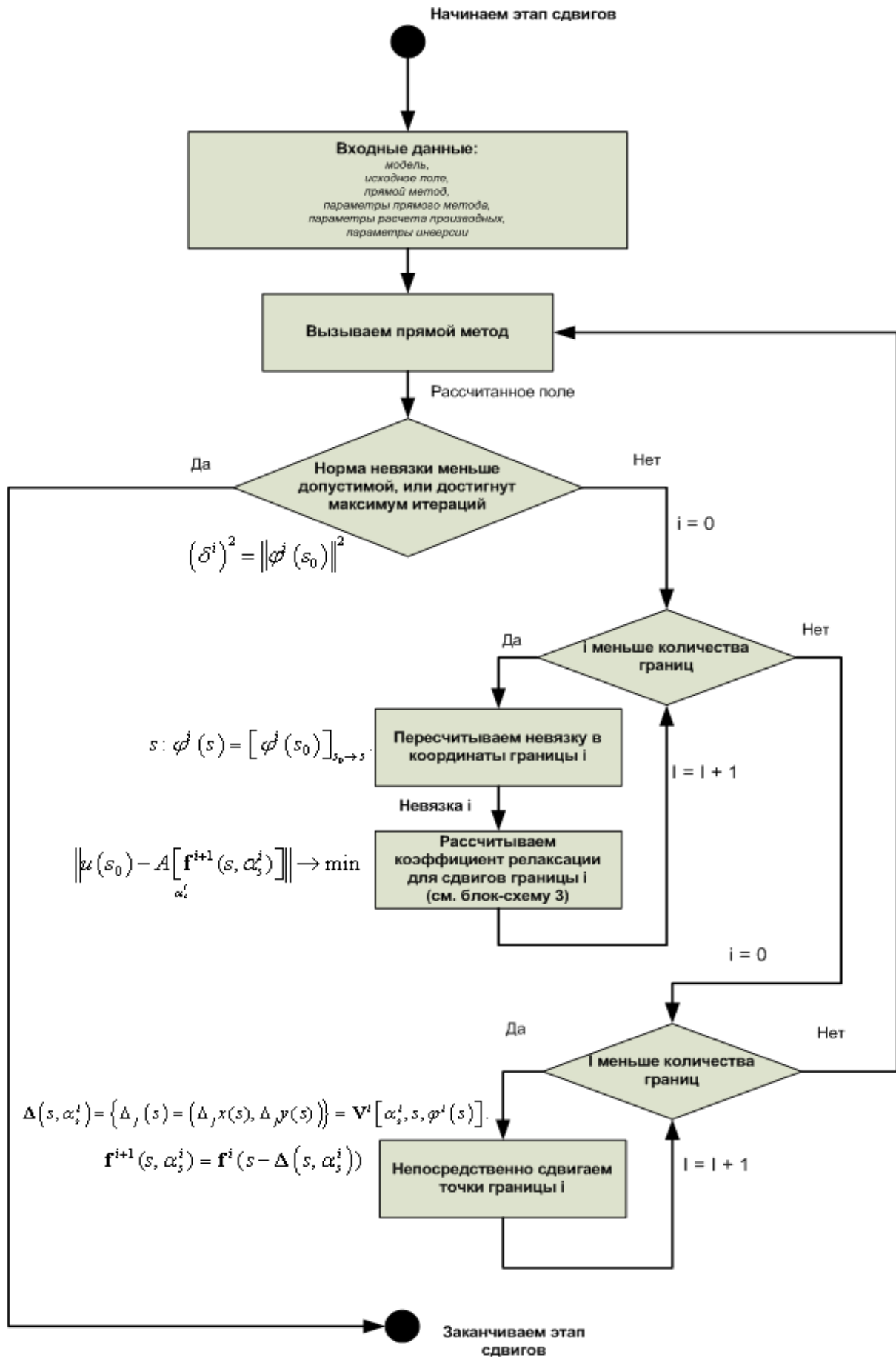


Рисунок 16. Блок-схема этапа сдвиговых деформаций итерационной схемы инверсии.

В четвертой главе «Применение разработанного программного обеспечения для создания физико-геологических моделей» описаны эксперименты по построению и анализу моделей сложнопостроенных структур, состоявшие из следующих этапов:

1) **Создание моделей нулевого приближения** при помощи программ GCIS и Playground. Этап включил в себя изучение исследуемой территории, импорт в модуль Playground изображения геологического разреза, наблюдаемого гравитационного поля, проведение оцифровки границ, наполнение модели плотностными характеристиками, расчет прямой задачи гравиразведки для определения качества нулевого приближения, корректировку границ интерпретатором с результирующей невязкой 16 миллигал, уменьшение невязки подбором плотностных неоднородностей, аппроксимируемых телами простой формы с невязкой 12 миллигал, формирование нулевого приближения – физико-геологической модели по профилю (рис. 17), импорт полученных данных в модуль EvDynInversion для последующего решения обратной задачи.

2) **Итерационная инверсия структурно-параметризованных моделей на основе эволюционно-динамических принципов.** После преобразования моделей профилей Воргамусюрской структуры в формат EvDynInversion были произведены следующие шаги: решение обратной задачи за счет сдвиговых деформаций границ, решение обратной плотностной задачи за счет выполнения дивергентных движений. Среди решений, соответствующих разным критериям оптимальности, было выбрано то, которое лучше согласуется с наблюдаемым полем, и не противоречит имеющимся представлениям о геологическом строении изучаемой территории. В связи с доработкой ограничения на диапазон изменения плотностных характеристик при решении обратной плотностной задачи, была проведена коррекция в программном комплексе GSIC и получена модель (рис. 18) с невязкой 1,8 миллигала.

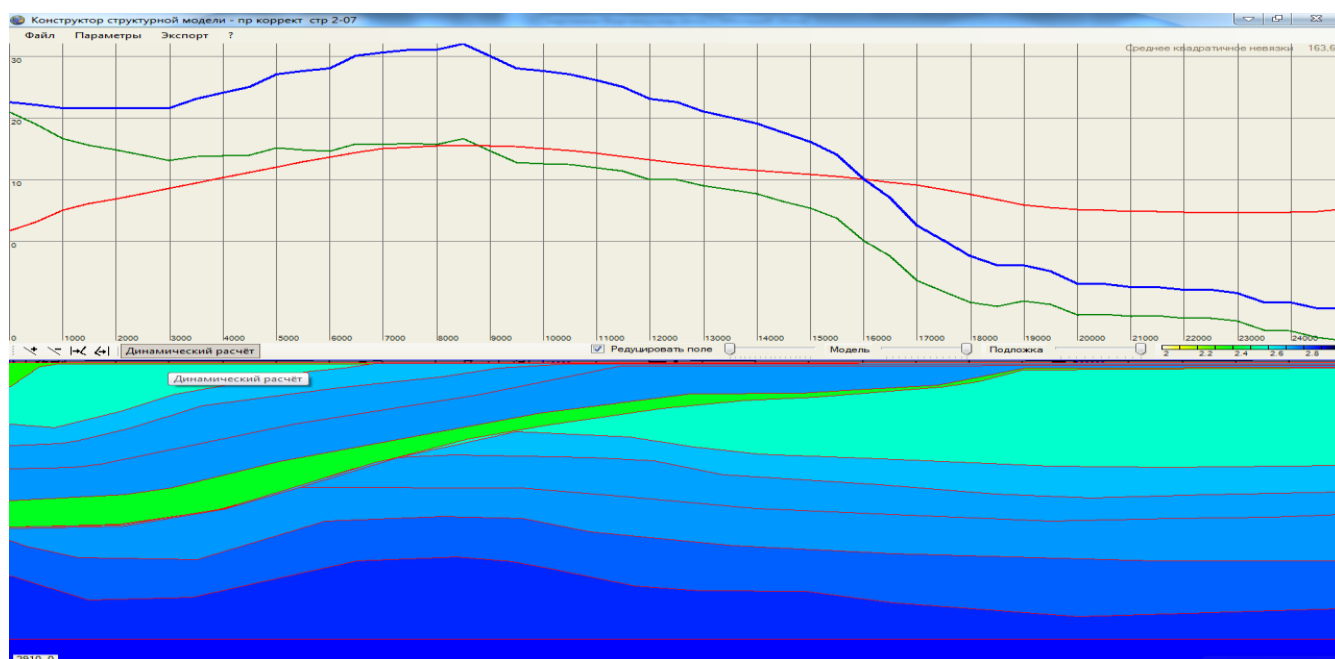


Рис. 17. Корректировка границ начальной модели по профилю 20992-07 Воргамусюрской структуры. Невязка 16 мГал

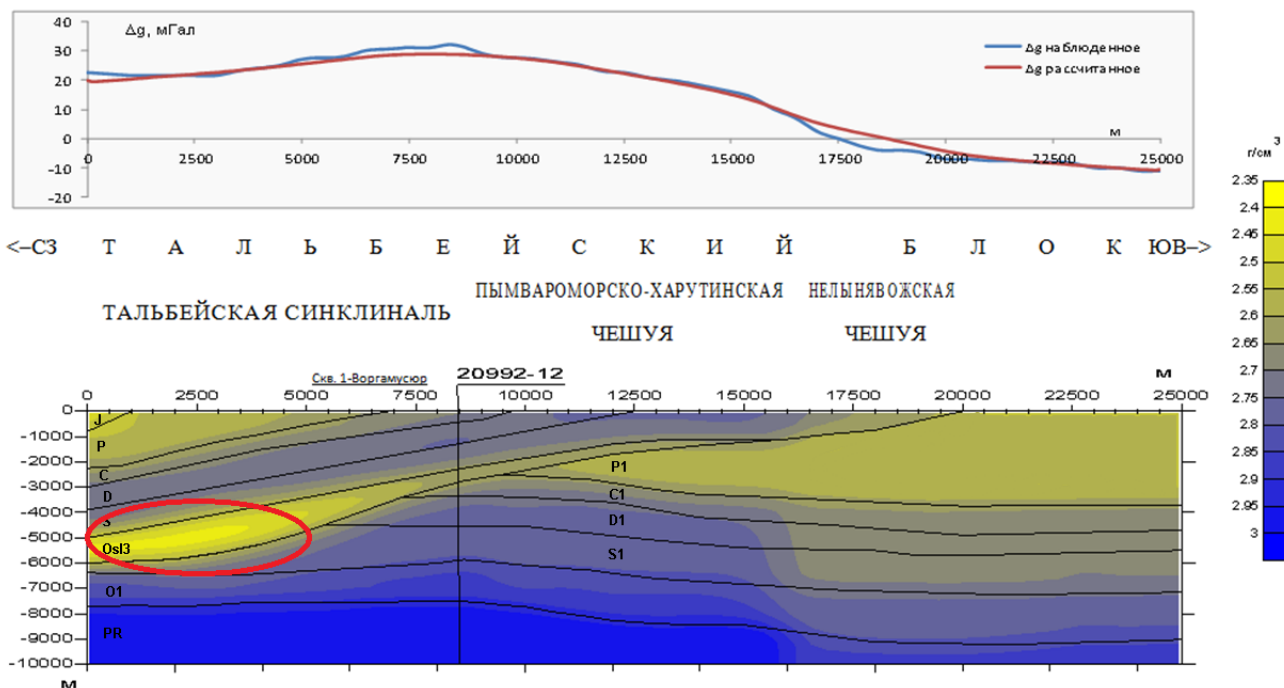


Рис. 18. Результирующая физико-геологическая модель по профилю 20992-07. Невязка 1,8 мГал

3) **Построение трехмерной физико-геологической модели** на основе опорных двумерных данных профилей. Этап включил в себя ввод площадных данных смоделированных профилей в программный редактор GeoVIP и импортирование файловых данных структурно-параметризованных моделей, согласование геометрии структурных карт с данными профилей, интерполяцию трехмерного распределения параметра на основе весового алгоритма, балансировку модели по гравитационному полю и трехмерную визуализацию (рис. 19)

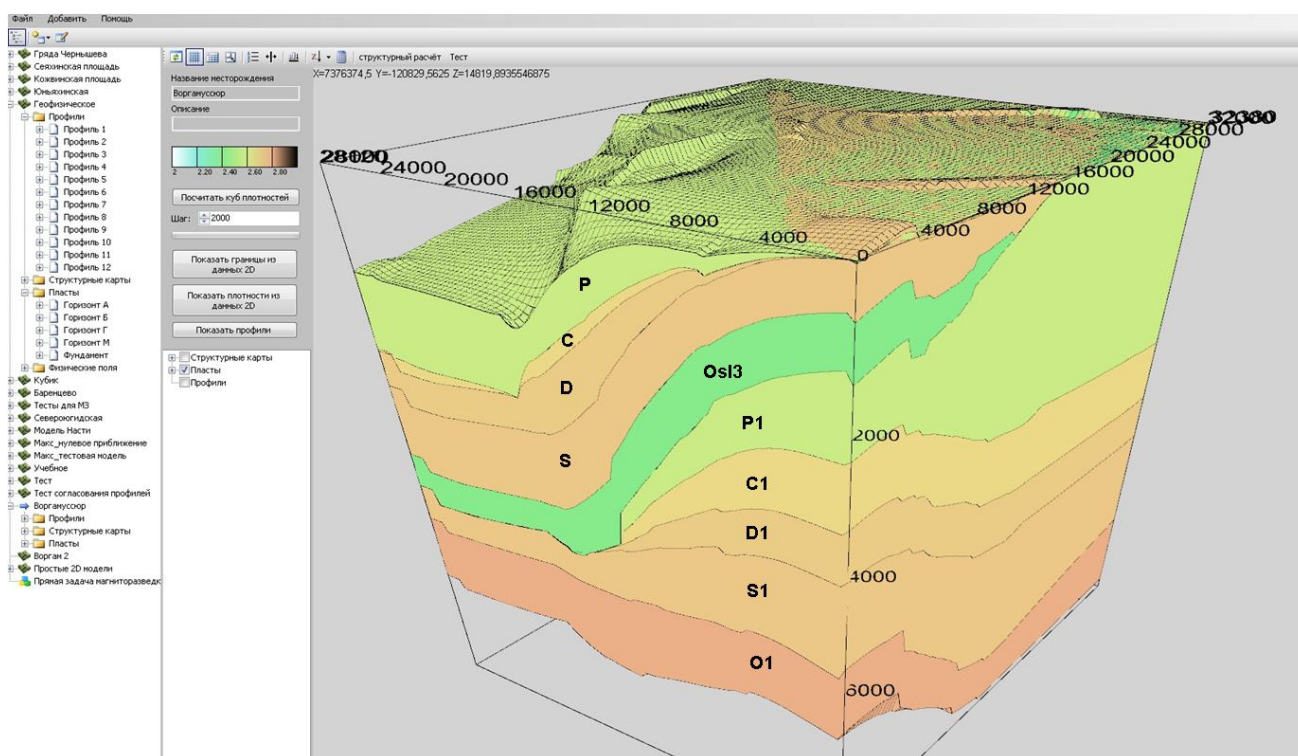


Рис. 19. Трехмерная структурно-плотностная модель Воргамусюрской структуры

4) **Геологическую интерпретацию** полученных результатов и выводы о работоспособности созданного программного обеспечения. Для Воргамусюрской структуры было уточнено строение соленосного купола, приуроченного к отложениям солюкинского горизонта и выделено аномальное распределение плотностей, позволяющее подтвердить предположение предшествующих исследователей о наличии перспективного на нефть и газ объекта. Преимуществом применения разработанного программного обеспечения является соответствие сформированных моделей наблюдаемым гравитационным полям, а также заданным эволюционно-динамическим критериям формирования среды, что обеспечивает состоятельность и содержательность полученного результата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненных в диссертации исследований состоят в следующем:

1) Были кратко описаны основные современные методики и средства физико-геологического моделирования, рассмотрена общая информационная модель геофизических исследований. Также описаны общие проблемы современных систем моделирования, среди которых следует отметить проблему описания сложных систем с помощью строгих, детерминированных методов.

2) Описаны принципы системного анализа физико-геологических данных, сформулированные А. И. Кобруновым и используемые при проектировании и разработке интегрированной среды построения сбалансированных физико-геологических моделей на основе геофизической инверсии. Рассмотрено понятие и основные принципы системной инверсии, а также её процедурные составляющие. На основе изложенных принципов поставлены требования к современной системе физико-геологического моделирования.

3) Изложена концепция и описан проект интегрированной среды физико-геологического моделирования на основе геофизической инверсии. Создано единое хранилище физико-геологических данных, алгоритмы конвертирования и передачи данных для использования в смежных системах анализа физико-геологических данных.

4) Разработан программный редактор физико-геологических моделей «GeoVIP», позволяющий создавать и поддерживать согласованные трехмерные модели месторождений на основе решений прямых и обратных задач гравиметрии и электростатической. В работе описано созданное математическое и программное обеспечение технологии эволюционно-динамического моделирования, а также инверсии структурно-параметризованных моделей на основе эволюционно-динамических принципов.

5) Созданное программное обеспечение апробировано в ходе построения ряда структурно-плотностных согласованных моделей профилей Воргамусюрской среды гряды Чернышева. Также при помощи редактора GeoVIP построены модели профилей Центральной части Обской губы, объёмные структурно-плотностные модели Геофизического месторождения, Баренцевоморского месторождения и Воргамусюрской среды.

**Основные положения диссертационных исследований
опубликованы в следующих работах:**

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

1. Барабанов М. И., Кобрунов А. И., Кулешов В. Е. Математическое обеспечение технологии эволюционно-динамического моделирования при инверсии геофизических данных // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, №2: – Москва, 2011. – С. 26—33.
2. Кобрунов А. И., Барабанов М. И., Куделин С. Г., Кулешов В. Е., Шилова С. В. Технология создания физико-геологических моделей сред на основе построения оптимальных решений обратных задач // Научно-технический вестник Поволжья, №3: – Казань, 2011. – С. 54—62.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

3. Кобрунов А.И. , Куделин С. Г. Барабанов М.И. Разработка редактора геолого-геофизических моделей среды // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2009» (18-20 марта 2009 г.): Материалы конференции: – Ухта, 2009. – С. 155—157.
4. Кобрунов А.И. , Куделин С. Г. Барабанов М.И. Разработка редактора геолого-геофизических моделей среды // конференция «Итоги Электронного Геофизического Года» (3-6 июня 2009 г.): Материалы конференции: – Переславль-Залесский, 2009. – С. 90.
5. Кулешов В. Е., Шилова С. В., Куделин С. Г. Барабанов М.И. Реконструкция геологических сред с применением программного редактора «GeoVIP» на примере структур Карского региона // 37-ой сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (25-29 января 2010 г.): Материалы семинара. – Москва, 2010. – С. 397—400.
6. Кобрунов А.И., Куделин С. Г. Барабанов М.И. Программный редактор геолого-геофизических моделей среды «GeoVIP» и его функциональные возможности // 37-ой сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (25-29 января 2010 г.): Материалы семинара. – Москва, 2010. – С. 54—57.
7. Кобрунов А.И., Куделин С. Г. Барабанов М.И. Программный редактор геолого-геофизических моделей среды «GeoVIP» и его функциональные возможности // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2010» (17-19 марта 2010 г.): Материалы конференции: – Ухта, 2010. – С. 63—65.
8. Кобрунов А.И., Куделин С. Г. Барабанов М.И. Программный комплекс создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды «GeoVIP» и его функциональные возможности // II Научно-практическая молодежная

- конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (6-7 октября 2010 г.): Материалы конференции: – Москва, 2010. – С. 18.
9. Кобрунов А.И., Куделин С. Г., Барабанов М.И. Алгоритмическое и программное обеспечение технологии создания физико-геологических моделей сред на основе построения оптимальных решений обратных задач // 38-ая сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (24-28 января 2011 г.): Материалы семинара. – Пермь, 2011. – С. 154—157.
 10. Кобрунов А.И., Куделин С. Г., Барабанов М.И., Кулешов В. Е. Применение принципов эволюционно-динамического моделирования для создания модификаторов структурных границ в программном комплексе GeoVIP // 38-ая сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (24-28 января 2011 г.): Материалы семинара. – Пермь, 2011. – С. 157—159.
 11. Кобрунов А.И., Куделин С. Г. Алгоритмы системной инверсии геофизических полей: математическое моделирование на основе эволюционно-динамических принципов // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2011» (18-20 марта 2011 г.): Материалы конференции: – Ухта, 2011.
 12. Куделин С. Г., Барабанов М.И., Кобрунов А.И. Создание интегрированной среды физико-геологического моделирования на основе решения задач инверсии геофизических полей // XIX Губкинские чтения «Инновационные технологии прогноза, поисков, разведки и разработки скоплений УВ и приоритетные направления развития ресурсной базы ТЭК России»(22-23 ноября 2011 г.): Материалы конференции: – Москва, 2011. – С. 108—109.
 13. Кобрунов А.И., Куделин С. Г. Итерационная схема инверсии геофизических полей с применением эволюционно-динамических принципов // 39-ая сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (30 января-2 февраля 2011 г.): Материалы семинара. – Воронеж, 2012. – С. 140—143.
 14. Кобрунов А.И., Барабанов М.И., Куделин С. Г. Интегрированная среда физико-геологического моделирования на основе инверсии геофизических полей // 39-ая сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (30 января-2 февраля 2011 г.): Материалы семинара. – Воронеж, 2012. – С. 152—154.

