МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Ухтинский государственный технический университет» (УГТУ)

А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин, Е. Н. Мотрюк

Интегрированная среда физико-геологического моделирования на основе системной инверсии

Монография

Ухта, УГТУ, 2015

Кобрунов, А. И.

К 55 Интегрированная среда физико-геологического моделирования на основе системной инверсии [Текст] : монография / А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин, Е. Н. Мотрюк. – Ухта : УГТУ, 2015. – 90 с.

ISBN 978-5-88179-896-3

Работа посвящена одному из важнейших вопросов современных математических методов анализа геолого-геофизической информации для сложных моделей сред – моделированию сложнопостроенных сред в условиях неопределённости. Приводится классификация моделей, используемых при анализе геолого-геофизических данных, включая модели среды и связей между параметрам. Разрабатываются формализованные и математически осмысленные методообразующие принципы системного анализа геолого-геофизических данных, включая системный анализ моделей, данных и связей между измеряемыми и искомыми параметрами моделей. Изучаются специфические для условий неопределённости методы моделирования сложнопостроенных сред, адекватные сформулированным методологическим принципам системного анализа, основу которых составляют методы системной инверсии многокомпонентных данных (Раздел 1. Кобрунов А. И.). На основе выполненных исследований создано программно-алгоритмическое обеспечение и технология анализа данных на основе принципов системной инверсии. В монографии рассмотрены состав, структура программного обеспечения и принципы взаимодействия между модулями, составляющими основу технологии (Раздел 2. Куделин С. Г.). Приведены примеры реализации технологии, поясняющие некоторые её особенности (Раздел 3. Мотрюк Е. Н.).

Результаты данной работы будут включаться в тематику лекционных и практических занятий курсовых, дипломных и диссертационных работ для студентов Института ГНиТТ.

УДК 550.8: 519.86 ББК 26.2

Рецензенты: А. С. Долгаль, ведущий научный сотрудник Горного института УрОРАН, д.ф.-м.н.; А. В. Григорьевых, ведущий научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н.

© Ухтинский государственный технический университет, 2015 © Кобрунов А. И., Куделин С. Г., Мотрюк Е. Н., 2015

ISBN 978-5-88179-896-3

Введение	5
1 Математические модели и принципы системного анализа	
в прикладной геофизике	7
1.1 Моделирование в задачах прикладной геофизики. Общие	
представления	7
1.2 Модели среды и их системная организация	
1.2.1 Геологический объект	
1.2.2 Физическая модель геологической среды	14
1.3 Модели геолого-геофизических связей и их системная	
организация	16
1.3.1 Уравнения математической физики	17
1.3.2 Наблюдаемые объекты	
1.3.3 Эталонирующие преобразования	
1.4 Параметризации моделей	
1.5 Классификация моделей	
1.5.1 Модели среды	
1.5.2 Модели поля	
1.5.3 Модель связей	
1.6 Принципы системного анализа при моделировании	
геологических сред в прикладной геофизике	
1.6.1 Первый принцип системного анализа	
1.6.1.1 Идентификация моделей	
1.6.1.2 Связи в физико-геологических моделях	
1.6.2 Второй принцип системного анализа	
1.6.3 Третий принцип системного анализа	
1.7 Системная инверсия и декомпозиция	
1.8 Синтез интегрированной ФГМ	
2. Программно-алгоритмическое обеспечение интегрированного	
системного анализа данных гравиразведки	
2.1 Системный подход к организации программно-	
алгоритмического обеспечения и физико-геологических	
данных	
2.2 Хранение и передача физико-геологических данных	45
2.3 Описание компонентов интегрированной среды физико-	
геологического моделирования	47

Оглавление

2.3.1 Программный комплекс создания и поддержки трехмерных	
физико-геологических моделей GeoVIP	47
2.3.2 Программное обеспечение построения нулевых	
приближений и решения прямой задачи гравиразведки для	
двумерных моделей	53
2.3.3 Математическое и программное обеспечение технологии	
эволюционно-динамических трансформаций и инверсии	
на основе ЭДП	55
3. Апробация разработанного программного обеспечения	59
3.1 Решение прямой задачи гравиразведки в Playground	59
3.2 Решение обратной задачи гравиразведки в EvDynInversion	69
3.3 Построение 3D-моделей на основе согласованной интерполяции	
данных профилей в редакторе GeoVIP	74
Заключение	86
Список литературы	88

Введение

Существует достаточно большое число компьютерных технологий обработки и интерпретации данных геофизических исследований, и построения геологических моделей среды разного уровня теоретического обоснования [1]. Тем не менее, проблема достоверности результатов моделирования остаётся исключительно актуальной. Это связано с существенным усложнением используемых геологических моделей, влекущим за собой недоопределённость, а зачастую и несогласованность и возможную противоречивость содержательных задач моделирования, в частности, инверсии геофизических данных. Информация о компонентах модели зачастую носит разрозненный, фрагментарный и косвенный характер, влекущий за собой несовместность постановок обратных задач и некорректность каждой из них. Например, информация о локальных аномалиях пористости проявляется фрагментарно в локальных аномалиях некоторых сейсмических атрибутов, аномалиях плотности, обнаружение и картирование которых требует совместного анализа несовпадающих между собой данных. В этой связи актуально использование системного подхода при анализе геологогеофизических данных, включающего в себя:

- разработку системных принципов анализа многокомпонентной, разнородной информации об изучаемых объектах;

- формулировку на их основе обратных задач для этих данных, ограничений и связей между разрозненными компонентами модели, организованных в структуру задачи системной инверсии комплекса геолого-геофизических данных;

- создание методов решения задачи системной инверсии, основанных на идеях декомпозиции;

- развитие и организация на этой основе технологического и программного обеспечения, поддерживающего интегрированную интерпретацию геологогеофизических данных.

Этой группе вопросов посвящена данная работа.

Важными составляющими технологии моделирования на основе системных принципов должны быть:

- алгоритмы и методики взаимного сопоставления и увязки данных различных исследований, а также интегрированной интерпретации;

- методы интерполяции геолого-геофизических данных, учитывающих эволюционно-динамическую информацию и процессы, протекающие в геоло-гической среде;

- организация итерационного уточнения обобщённой физикогеологической модели.

Собственно, основная часть работы это описание технологии, и оригинального программно-алгоритмического комплекса, разработанного в УГТУ для реализации методов системной инверсии, служащей основой современного подхода к интерпретации геолого-геофизических данных в условиях недоопределённости. Поскольку реализация системной инверсии основана на декомпозиции задачи, то и программно-технологическое обеспечение «рассыпается» на решение частных задач, следующих из модели декомпозиции, с последующим синтезом их результатов в организованной интегрированной базе данных о физико-геологической модели среды. Для полноты и связности изложения этой части работы предшествует теоретическая, в которой приведён необходимый понятийный аппарат и основы теории системной инверсии. Изложение этой части основано на работе [2].

1 Математические модели и принципы системного анализа в прикладной геофизике

1.1 Моделирование в задачах прикладной геофизики. Общие представления

Особенность задач математического моделирования в науках о Земле состоит в многокомпонентности вводимых моделей, наличии сложных взаимосвязей между компонентами и параметрами, входящими в описание модели изучаемого объекта. Взаимосвязи между компонентами играют решающую роль в задачах изучения особенностей геологических объектов, и без этих взаимосвязей моделирование нереализуемо.

В науках о Земле задачи моделирования можно условно расчленить на три главных компоненты:

- моделирование геологических сред;

- моделирование геофизических полей;

- моделирование физико-геологических процессов, происходящих в геологической среде под влиянием естественных или искусственных источников для этих процессов.

Это тесно связанные между собой задачи, однако, всегда сохраняющие свою специфику.

Задачей моделирования геологической среды является построение системы её физико-геологических моделей, с согласованными параметрами и соответствующими физическими полями. По сути, геологический объект рассматривается как система своих проекций-отражений в форме конкретных физико-геологических моделей.

Геологические объекты являются сложной иерархической системой, в связи с чем изучаться они должны с позиций системного анализа – анализа целого, составленного из частей (рис. 1.1).

Построенная система непротиворечивых моделей среды, взаимосвязанных по параметрам с различными своими компонентами и соответствующими физическими полями, называется обобщённой интегрированной моделью геологической среды, или просто *обобщённой физико-геологической моделью* (ОФГМ).

Параметры, входящие в описание конкретных содержательных физикогеологических моделей с помощью заданных отображений, проявляются в наблюдаемых геофизических полях и, кроме того, связаны некоторыми зависимостями с параметрами других содержательных физико-геологических моделей одной той же обобщённой физико-геологической модели (рис. 1.2). *Интегрированные физико-геологические модели геологической среды* – это компоненты системы, состоящие из моделей распределения конкретного физического параметра, построенные на основе решения соответствующей задачи инверсии согласованно со всем комплексом имеющейся геолого-геофизической информации о рассматриваемой модели (например, плотностной или скоростной).



Рисунок 1.1 – Отражение геологического объекта в зеркале физико-математических моделей



Рисунок 1.2 – Организация обобщённой физико-геологической модели

Процесс такого моделирования включает в себя решение частных обратных задач или задач инверсии, состоящих в нахождении модели среды по известной ей соответствующей модели физического поля. Используя термин «обратная задача» или «инверсия» следует уточнить, для какого физического поля эта процедура реализуется. Употребляется термин «обратная задача» («задача инверсии») для соответствующего уравнения математической физики или соответствующего оператора прямой задачи. Это эквивалентные термины. построения плотностной Например, модели как компоненты физикогеологической модели, соответствующей заданному гравитационному полю обратной задаче гравиметрии. Или задача инверсии для оператора прямой задачи гравиметрии.

Задачи моделирования геофизических полей, как правило, носят подчинённый характер и состоят в расчёте модели поля для конкретного содержательного элемента физико-геологической модели среды. Например, это задача расчёта компонент гравитационного поля по заданной предполагаемой плотностной модели. Такой тип задач носит также название «решение прямой задачи». Этот этап является промежуточным для решения задачи моделирования среды и, в частности, решения пометодных обратных задач или задач инверсии.

Задача моделирования физико-геологических процессов, происходящих в геологической среде под влиянием естественных или искусственных источников для этих процессов служит, как правило, для изучения, уточнения, и предсказания результатов процессов, происходящих с элементами геологической и физико-геологической модели среды. Например, моделирование процессов образования соляных диапиров под влиянием силы тяжести вышележащих пород на основе решения уравнения вязких течений, служит, прежде всего, проверкой гипотезы о возможном механизме формирования подобных структур. Точно также моделирование процессов движения под действием прилагаемых сил используется для изучения и уточнения геодинамических факторов, приведших к современным наблюдаемым структурам. Моделирование процессов изменения дебита скважины под действием закачки теплоносителя соответствует решению задачи предсказания этого дебита при различных параметрах и выработки оптимальной стратегии разработки месторождений высоковязких нефтей.

Необходимость системного подхода в построении моделей геологических сред определена фундаментальными обстоятельствами, связанными со сложностью и многокомпонентностью изучаемых объектов. Главным служит понимание того, что целое – геологический объект – это не есть просто суперпозиция своих элементов, но объединение их внутренними взаимосвязями и взаимовли-

яниями, превращающих эти элементы в целое, наделённое новыми качествами. В этом новом качестве изменение одного компонента влечёт перестройку и переорганизацию всей системы. Например, изменение плотности как одного из элементов системы параметров, характеризующих геологический объект, тут же влечёт за собой необходимость изменения скорости распространения упругих волн, пористости, проницаемости, других геомеханических характеристик, превращая тем самым исходный геологический объект в совершенно иное образование. Изменение плотности ведёт к изменению гравитационного поля, но через связи внутри объекта – и к изменению других наблюдаемых эффектов – поля времён в сейсморазведке, электрических параметров, измеряемых в скважинах. Варьировать один параметр при реконструкции модели среды вне взаимосвязи с другими неправомерно. Далее, многокомпонентность объекта изучения ведёт к многокомпонентности его проявления в наблюдаемых физико-геологических эффектах. Рассматривать их следует совместно с взаимозавипредопределёнными симостями между НИМИ, зависимостями между элементами, складывающими объект. Наконец, сложность моделей сред влечёт за собой проблемы эквивалентности в решении соответствующих обратных задач, в связи с чем последние следует рассматривать только с доопределяющими условиями, следующими из факта существования взаимосвязей и взаимоопределённости элементов.

Системный анализ в прикладной геофизике включает в себя два крупных этапа. Во-первых, это собственно системный анализ физико-геологической модели, итогом которого служит формирование непротиворечивой и достаточно полной математической модели компонент изучаемого объекта с определением их иерархической организации, взаимосвязи и параметров, входящих в описание модели. Это этап системного анализа данных. Это систематизация данных. Другой крупный этап – это формулировка задачи реконструкции параметров объектов (среды или процесса) на основе построенной системной модели. Эта последняя задача называется задачей системной инверсии.

1.2 Модели среды и их системная организация

Приближённое описание объекта реализуется с помощью *модели* (или просто *модели среды*), представляющей собой приближенное формализованное описание объекта, допускающее его конструктивное использование как самостоятельного элемента системы взаимодействующих объектов (рис. 1.3). В конструкцию модели входит идентификатор объекта. Это его название. Перечень параметров, используемых для его описания и связи, установленные между параметрами объекта и параметрами других объектов системы.



Рисунок 1.3 – Модель. Общая структура

Моделей одного и того же объекта может быть много. Они сами образуют систему, допускающую упорядочение, и отличаются между собой как выделенными для описания параметрами, так и используемыми между параметрами и другими объектами связями. На множестве Σ всевозможных моделей одного и того же объекта может быть выделено подмножество \mathbb{R} , допускающее систематизацию относительно операции включения, и множество \mathbb{Z} -моделей, пересечение между элементами которых пусто. Многообразие \mathbb{R} называется системой уточняющих моделей. Если $r_1, r_2 \in \mathbb{R}$ и $r_1 \subset r_2$ то r_2 есть декомпозиция r_1 (разделения целого на части). Аналогично r_1 есть агрегирование r_2 . Класс \mathbb{Z} называется системой дополняющих моделей.

Уточняющие модели используются для более подробного описания частей агрегированной модели. Так, например, моделью для некоторого объекта может служить прямоугольная призма со значением некоторого параметра (например, плотности) σ . Задание этого параметра определяет физическую модель. При этом размеры призмы и её положение в пространстве считаются заданными. Уточняющей моделью может служить разбиение этой призмы на элементы, каждый из которых имеет своё значение параметра $\sigma(i, j, k)$, как это изображено на рисунке 1.4а.

Описание модели состоит в задании для каждой ячейки (i, j, k) значения параметра $\sigma(i, j, k)$. Дополняющей моделью той же среды может служить система поверхностей с уравнениями $z = f_i(x, y)$, $i = 0 \div N$, разделяющими заданные значения параметров $\sigma_i = \sigma_i(x, y)$ (рис. 1.4б). Её формирование состоит в задании уравнений поверхностей $z = f_i(x, y)$, $i = 0 \div N$ и позволяет учитывать структурные особенности изучаемой среды. Обе эти модели относятся к одному и тому же объекту – модели с именем, например, «плотностная модель». Но характер параметризации и, как следствие, её связь с другими объектами – различны.



Рисунок 1.4 – Уточняющая (а) и дополняющая (б) модели

1.2.1 Геологический объект

Геологический объект – предмет изучения в геологии. Это исходное и наиболее общее понятие, которое основывается на совокупности предметных геологических и физических его компонентах. При изучении геологического объекта в целом необходимо охарактеризовать его компоненты – более узкие предметные области: тектонические, стратиграфические, литологические, геоморфологические, геодинамические и многие другие взаимосвязанные между собой свойства. Именно они, являясь самостоятельными объектами изучения, в целом со своими взаимосвязями образуют то большое и не вполне определённое понятие, которое называется «геологический объект». Строго говоря, компоненты геологического объекта должны называться его моделями стратиграфической, динамической, литолого-фациальной и так далее. Но каждая из этих моделей весьма сложна, допускает множественность языков описания (т. е. моделей во введённом выше понимании), присущих этому языку параметров, характеризующих модель (в узком понимании) и связей между ними и параметрами других моделей. Именно поэтому эти укрупнённые, но конкретные характеристики геологического объекта, являясь его моделями, сами служат объектами для следующего, более низкого этажа системной организации модели геологического объекта.

В качестве такого этажа может выступать интегрированная *физикогеологическая модель* как проявление в виде системы (или подсистемы) взаимосвязанных физических моделей свойств геологической модели. Геологический объект, равно как и его компоненты (литологические, стратиграфические и другие), зачастую недоступен для прямого изучения. Связано это с глубинностью и некоторой условностью, как следствие неизмеримостью самих геологических параметров. Информация о них поступает только в той мере, в которой эти параметры связаны с физической моделью геологической среды –

физическими параметрами, а последние уже измеримы, хотя и косвенным образом, посредством регистрации соответствующих геофизических полей в виде характерных для них параметров. Следует понимать, что изменение литологической разновидности горных пород может отражаться в наблюдаемых физических полях – гравитационном, магнитном, волновом, лишь в той мере, в которой это изменение приводит к изменениям в физических свойствах пород, слагающих геологический объект – плотности, магнитной восприимчивости, скорости распространения упругих колебаний.

Интегрированная (обобщённая) модель геологического объекта или просто геологическая модель – это система связанных между собой компонент содержательных геологических моделей – литологической, фациальной, стратиграфической и так далее (рис. 1.5). Если различные литологические разности обладают тождественными физическими свойствами (из диапазона рассматриваемых), то они не различимы геофизическими полями и тождественны с точки зрения принятого комплекса геофизических методов.



Рисунок 1.5 – Системная организация геологической модели

Функциональным отличием компонент геологической модели от физической состоит в том, что в наблюдаемых величинах её компоненты отображаются опосредовано, через элементы физической модели, с которой геологическая связана физико-геологическими зависимостями. По сути, к элементам геологической модели следует отнести любой параметр, не имеющий явного проявления в регистрируемой наблюдаемой, но влияние которого проявляется опосредовано через измеряемые эффекты от других физических параметров.

1.2.2 Физическая модель геологической среды

Структура физико-геологической модели (рис. 1.6) в целом повторяет структуру геологической. Обобщённая или интегрированная физикогеологическая модель – это система взаимоувязанных физико-геологических содержательных моделей геологической среды. Содержательная физикогеологическая модель – это модель распределения конкретного физического параметра, увязанного с другими геологическими данными. Если такой увязки специально не выполнялось и модель не согласована (не согласовывалась) с другими данными, то она называется физической моделью геологической сре*ды.* Физическая модель – это то, что соответствует наблюдаемому геофизическому полю. Если физическая модель согласована с другими данными, но остаётся моделью выделенного параметра, она называется физикогеологической. Взаимоувязанная система физико-геологических моделей для различных физических параметров называется интегрированной физикогеологической моделью. Также как для геологического объекта, определение которого осуществляется через предметные компоненты, так и для физической модели выделяются модели его содержательных свойств – плотностные, скоростные, геоэлектрические и так далее. Следует понимать, что физическое свойство, например, плотность, на этом этапе информационной модели – это физический объект, а взаимоувязанный способ его описания – язык; используемые для этой цели параметры и их взаимосвязь определяют плотностную модель. Плотностных моделей, как и прочих других, может быть много. Они отличаются по языку описания и, как следствие, используемым параметрам, связям с другими параметрами.

Например, в качестве плотностной модели может выступать функция пространственных переменных, значение которой в каждой точке есть плотность, присущая изучаемой среде в этой же точке. Другой плотностной моделью может выступать структурная модель, в которой используются границы раздела заданных сред, а параметрами служат значения глубин залегания гра-

ниц в данной точке. Иная плотностная модель возникает при рассмотрении распределения некоторого интегрированного параметра, для которого указана его связь с гравитационным полем. И хотя этот параметр не является плотностью в её обычном понимании, он характеризует именно плотностную модель.



Рисунок 1.6 – Системная организация физико-геологической модели

Наличие связей между различными предметными компонентами физикогеологической модели, являющиеся следствием того, что все они суть проявления единой для всех геологической модели приводит к тому, что изменения, осуществляемые в одной из физических моделей, должны быть согласованы с изменениями во всех других, что существенно снижает допустимую область вариации параметров при подборе моделей с целью изучения свойств геологического объекта. В этом состоит проявление эффекта синергизма, когда наличие связей между элементами системы приводит к большей надёжности реконструкции всех элементов моделей в сравнении с пометодными – отдельными реконструкциями. Такое положение дел давно известно в задачах моделирования в науках о земле и состоит в постулате о большей информативности и надёжности комплексной интерпретации геолого-геофизической информации в сравнении с наложением совокупности моделей, полученных в результате интерпретации отдельно взятых методов. 1.3 Модели геолого-геофизических связей и их системная организация Модели геолого-геофизических связей – это заданные отображения элементов геологических моделей в элементы физико-геологической модели. Собственно их присутствие делает возможным постановку вопроса о геологическом истолковании геофизических данных. Системная организация моделей и связей схематически приведена на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Системная организация моделей объектов и моделей связей в прикладной геофизике

Связи носят между компонентами моделей весьма разнообразный характер. Чаще всего это петрофизические связи, установленные в лабораториях и характеризующиеся нечёткостью. Они представимы в форме корреляционнорегрессионных зависимостей между геологическими и геофизическими данными, или отношениями между параметрами как нечёткими величинами. Сюда относятся и экспертные заключения о принадлежности объекта, характеризующегося заданными свойствами, к определённому классу. Объективно дело должно выглядеть так, чтобы каждой геологической модели однозначно соответствовали конкретные элементы физико-геологической. Практически возникающая ситуация, когда одному и тому же набору геологических параметров соответствуют различные значения физических параметров, приводит к неоднозначности в реконструкции элементов геологической модели по известной физико-геологической модели.

1.3.1 Уравнения математической физики

Уравнения математической физики – это условное название моделей тех связей, которые используются для расчёта физических полей по известным компонентам физико-геологической модели. Они установлены для всех практически используемых в науках о Земле рациональных физических полей и имеют вид дифференциальных, интегральных или интегро-дифференциальных уравнений. Эта связь может быть определена в виде отображения «физической модели среды в физическое поле» – распределения физических параметров в соответствующие им физические поля. Таковы, например, уравнения Максвелла, позволяющие рассчитать компоненты электромагнитного поля по заданным электромагнитным параметрам среды и краевым условиям. Таковы уравнения, следующие из закона всемирного тяготения, позволяющие рассчитать компоненты гравитационного поля по заданной плотностной модели среды. Также как и для моделей геолого-геофизических связей истинные, правильные уравнения в определённых случаях могут быть чрезмерно сложны (например, распространение волн в неоднородных средах) или даже неизвестны (уравнения переноса в мутных, рассеивающих средах). В этой связи используют упрощённые модели уравнений, и мера упрощения может оказаться неадекватной природе вещей. Например, используя в качестве упрощённой зависимости в гравиразведке корреляционную связь между глубиной залегания плотностной границы и величиной вертикальной производной гравитационного потенциала, мы, тем самым, выходим за границу природы вещей, поскольку такая связь неестественна, не отражает свойства гравитационного поля. Но может применяться локально – в узком круге ситуаций и для конкретного региона. Расчёт физического поля на основе решения уравнения математической физики исключительно важная и распространённая операция, имеющая специальное название – *моделирование физических полей*.

Модели физического поля, физические модели среды и уравнения математической физики образуют единый конгломерат – *модель геофизического метода*, и в совокупности своей позволяют однозначно рассчитать модель поля по известной модели среды. Эта операция называется решением прямой задачи. Модели физического поля – это те объекты, для которых в последующем строится процесс реконструкции модели физических параметров и, возможно, моделей геологических сред. Однако реально измеряемые – наблюдаемые величины могут отличаться, а иногда и весьма существенно, от теоретических, расчётных моделей физического поля. В этой связи их следует выделить в отдельный этаж системы моделей, относящихся к физикогеологической модели.

Совокупность геофизических полей, отражающих строение физикогеологической модели, следует рассматривать как физическое проявление содержательных элементов системы физико-геологической модели и взаимосвязи между ними не имеют самостоятельного значения. Они (взаимосвязи между физическими полями) являются проявлением и следствием существующих взаимосвязей между параметрами элементов физико-геологической модели, а также, возможным влиянием на их значение геофизических полей. Например, в качестве такого влияния может выступать пьезоэлектрический эффект, состоящий в изменении электрических параметров под действием акустических полей. Далее в свойствах геофизического поля отражаются зачастую не один элемент физико-геологической модели, а их набор. Например, сейсмическое поле определено набором физико-механических характеристик горных пород, в число которых входит плотность, параметры упругости, реологические свойства горных пород. Все эти различные компоненты ФГМ участвуют в формировании сейсмического поля. Таким образом, регистрируемые физические поля не имеют самостоятельной системной организации, но наследуют её как следствие системной организации элементов физико-геологических моделей и законов моделирования физических полей по компонентам ФГМ.

1.3.2. Наблюдаемые объекты

Наблюдаемые представляют собой объекты, характеризующиеся параметрами, которые реально измеряются геофизическим методом вместо соответствующих, желаемых теоретических моделей физического поля. Природа наблюдаемых и их взаимосвязь с моделями физических полей весьма разнообразны. Это влияние калибровки приборов, как это происходит в методах радиокаротажа, аппаратурные влияния, связанные с передаточной активного функцией приборов, зоны малых скоростей, как это происходит в методах сейсморазведки, и, прежде всего, в модификациях с невзрывными источниками возбуждения, дискретность самих измерений и эффекты с этим связанные (появление зеркальных частот и т. д.). Это эффекты разновысотности и дискретности измерений на ограниченной базе наблюдений вместо непрерывно всюду заданного поля в гравиразведке и магниторазведке. Различия между моделями физического поля и наблюдаемыми могут включать в себя и более тонкие эффекты несовершенства теоретических представлений. Так, принимая, что измеряется аномальная компонента вертикальной производной гравитационного потенциала, и строя на этой основе методику расчёта аномалии, допускается погрешность (пусть небольшая, но она есть), состоящая в том, что даже без учёта всего прочего реально на измерительный прибор – гравиметр – влияет не вертикальная, а отличающаяся от неё нормальная компонента поля – по направлению нормали к уровнённой поверхности силы тяжести, а не по вертикали, а отсюда следуют и поправки к способам вычислений аномалии. Перечень подобного рода отличий между наблюдаемой и моделью физического поля легко может быть продолжен за счёт того, что наблюдаемые данные осложнены погрешностями разной природы. Это погрешности аддитивные – зашумление данных ошибками различной природы и интенсивности, погрешности аппаратные – мультипликативные, искажающие исходные данные, порой до полной неузнаваемости способом известным либо неопределённым. Таким образом, понятие наблюдаемая – это собирательный образ того отличия между тем, что реально имеется в качестве исходных данных и тем, что бы мы хотели в их качестве иметь, – под какую информацию строятся процедуры реконструкции физико-геологических моделей.

В последнем примере, прежде чем строить интерпретационные процедуры следует разобраться с тем, каким искажающим фактором подверглось поле, как его по возможности очистить от этих искажений, выделив полезные, интерпретируемые компоненты. Совокупность тех преобразований, которым подверглось исходное теоретическое поле до того вида, который дан в наблюдаемых, называется эталонирующим преобразованием.

1.3.3 Эталонирующие преобразования

Эталонирующие преобразования – это те преобразования, которые следует произвести с моделью физического поля, для того чтобы оно стало адекватным результатам измерений. Также как и для моделей геологогеофизических связей истинные, правильные уравнения для эталонирующих преобразований могут быть чрезмерно сложны или даже неизвестны. В этой связи используют упрощённые модели уравнений, следующие из представлений, положенных в основу модели регистрации сигналов. Если обозначить физическую модель поля u(s), а наблюдаемую обозначить $u(s_i)$, где s_i – точка, в которой производится измерение, то можно предложить, например, следующую модель эталонирующего преобразования. На первом этапе поле u(s)подвергается мультипликативным, искажающим преобразованиям с помощью аппаратной функции K(s): $u(s) \cdot K(s)$. После этого на результат накладывается аддитивная помеха N(s): $u(s) \cdot K(s) + N(s)$ и далее от полученного результата вычисляется система функционалов $\Omega_i(u(s) \cdot K(s) + N(s))$, значения которых и принимаются в качестве величины наблюдаемых в точках *s_i*. Действие функционала может состоять, например, в расчёте среднего значения $\Omega_i(u(s) \cdot K(s) + N(s))$ в некоторой окрестности точки s_i с весами, зависящими от удаления усредняемых значений от точки усреднения. Однако сказанное – это только лишь поясняющий пример того, как может выглядеть модель эталонирующих преобразований. К эталонирующим преобразованиям может быть применён термин «редукция» в том понимании, что она учитывает реальные геолого-геофизические условия проведения работ и влияние на результат реального измерения большого числа искажающих геологических факторов, не входящих в уравнения математической физики. Эти искажающие факторы должны быть учтены при сопоставлении результатов моделирования с наблюдаемыми физическими полями.

1.4 Параметризации моделей

Выбор параметров модели объекта зависит от характера решаемой задачи, используемого метода её решения и вида тех связей между параметрами, которые ожидается использовать. Среди всего многообразия задач моделирования в науках о земле особо выделяется задача изучения объекта за счёт реконструкции, определения параметров, характеризующих модель на основе имеющихся связей между введёнными параметрами изучаемого объекта и соответствующих физических полей, которые называются *наблюдаемыми*. Её особое положение состоит в том,

что большая часть задач моделирования либо сводится к этой последней задаче, либо представляет собой её некоторый фрагмент.

Параметры и связи, входящие во все компоненты моделей и, прежде всего, элементов физико-геологической модели, представляют собой главный элемент модели. Они устанавливают взаимозависимости между различными параметрами элементов физико-геологической модели и соответствующими физическими полями и их наблюдаемым компонентам. Построение и анализ этих связей с последующим их использованием при анализе результатов наблюдений – одна из основных задач системного анализа в науках о Земле.

В зависимости от описываемых классов объектов выделяют три типа моделей: модели, относящиеся к описанию среды как объекта моделирования; модели, относящиеся к описанию наблюдаемой, чаще всего представляющей собой поле, физической величины (Например, гравитационное поле, если моделируемая среда рассматривается в своём проявлении как плотностная.); модели связей между моделями среды и наблюдаемой, которую далее будем называть также полем. К первому типу относятся компоненты геологических и физикогеологических моделей. Ко второму – модели физического поля и наблюдаемой, к третьему – геолого-геофизические связи – зависимости между параметрами элементов физико-геологической модели и параметрами компонент геологической модели; уравнения математической физики, устанавливающие связь между компонентами ФГМ и соответствующими геофизическими полями и эталонирующие преобразования, под которыми понимаются преобразования физических полей в наблюдаемые – исходные данные, доступные для измерения. Рассмотрим подробнее модели связей.

1.5 Классификация моделей

Для классификации моделей можно использовать различные принципы. В соответствии с решаемыми классами задач: реконструкция моделей, изучение взаимосвязей и моделирование полей рассмотрим классы моделей, характерные для решения именно этих задач. Это (рис. 1.8) классы моделей среды, классы моделей поля или наблюдаемых связей между ними, или более общих связей между параметрами разного класса моделей.



Рисунок 1.8 – Классификация типов моделей

1.5.1 Модели среды

По своему назначению подразделяются на аппроксимационные и динамические.

Аппроксимационные модели, как это следует из названия, предназначены для аппроксимации среды набором элементарных объектов из заданного класса. Этот класс обозначаем М. Чаще всего, в качестве аппроксимирующих элементов выступают элементарные геометрические объекты. Например, это система призм, уступов, многоугольников, предназначенных для аппроксимации плотностной модели геологического объекта. Каждый элемент аппроксимирующей системы имеет свои параметры – размеры, глубину залегания, плотность, если речь идёт о плотностной модели. Перечень этих параметров составляет параметризацию модели, а ограничения, накладываемые на их значения в связи с дополнительной информацией, в том числе и в связи с другими моделями, требованиями согласованности с геофизическими полями, образуют систему связей. Важной характеристикой аппроксимационной модели служит погрешность аппроксимации множеством M элемента $\xi : \varepsilon(M, \xi) = \min_{m \in M} \|\xi - m\|$. Элемент ξ принадлежит к некоторой более общей – уточняющей модели M_0 , например, распределению плот-

ности как функции координат. Если заранее известно, что изучаемый объект

принадлежит некоторому множеству Ξ , то $\max_{\eta \in \Xi} \varepsilon(M, \eta) = \varepsilon(M, \Xi)$ характеризует

аппроксимационную способность M для описания Ξ .

Динамические модели предназначены для характеристики процессов, происходящих в изучаемой среде. Типичным примером такого рода моделей служат тектонофизические модели, системы палеореконструкций, следующих из рассмотрений обратных задач геодинамики, модели переноса вещества в термогравитационных и термохимических мантийных конвекций. Динамические модели определяются заданием уравнений, которым подчиняется процесс, и системой параметров его характеризующих – например, распределениями напряжений, физико-механическими свойствами среды. Типичным примером динамической модели служит уравнение Навье – Стокса, характеризующего вязкое течение жидкости (например, Ньютоновой и несжимаемой) и его частные случаи – приближение Буссинеска и др. Параметрами служат система внешних сил, коэффициенты вязкости, плотность. Наряду с однофазными движениями, могут быть рассмотрены многофазные, подчиняющиеся более сложным уравнениям, следующих из законов фазовых превращений. Динамические модели имеют своей целью с той либо иной степенью точности описать эволюцию рассматриваемой геосистемы, прежде всего с позиций механики сплошных сред. Однако чаще всего удаётся с большей либо меньшей долей подобия описать лишь фрагменты этой эволюции и оправдать выдвижение гипотез о развитии и формировании современного вида системы.

Модели среды по характеру используемых параметров подразделяются на содержательные и эффективные.

Содержательные модели наиболее ясные и пригодные для физикогеологических выводов. Они имеют своей целью описание объекта в традиционных физических или геологических терминах. Сюда относятся: конкретные физические параметры, такие как: плотность, упругие параметры, электрические, магнитные свойства и многое другое; физико-геологические параметры, такие как литологические возрастные (стратиграфические), ёмкостные, коллекторские; геометрические параметры используемых моделей, характеризующие взаиморасположение компонент модели. Вопрос о перечне параметров в содержательных моделях чаще всего тривиален, поскольку он предопределён видом выбранной физико-геологической модели. Однако весьма существенен вопрос о связях между параметрами и их проявлениями в физических полях.

Эффективные модели вводятся и используются чаще всего для построения и изучения содержательных физико-геологических моделей. Среди эффек-

тивных моделей выделяются модели эффективного параметра, формально эквивалентные и комплексные модели.

Модели эффективного параметра представляют собой результат применения эвристических, чаще всего, нелинейных преобразований к наблюдаеили физическим полям. Результат такого преобразования даёт МЫМ распределение некоторой величины, для которой экспериментально установлены случаи связи между особенностями её пространственного распределения и некоторыми элементами физико-геологической модели среды. Яркими представителями этих приёмов служат метод полного нормированного градиента В. М. Берёзкина и метод яркого пятна при решении задач выделения аномальных зон в геологической модели. Эффективный параметр не имеет размерность конкретного физического параметра, а даже если и имеет, то рассчитанное от него с помощью уравнений математической физики поле не соответствует исходному. Это принципиально важное свойство эффективных моделей. Этот параметр подобен изображению объекта в инфракрасном диапазоне излучения – несёт о нём полезную информацию, но отличается от того, что видно в обычном – видимом – диапазоне спектра. Эту аналогию можно продолжить, считая модели эффективного параметра некоторыми специального вида изображениями реальной среды, возможно и в некотором «экзотическом» свете.

Формально-эквивалентные модели представляют собой особый класс моделей среды. Как уже указывалось при обсуждении интерпретационной модели, характерной чертой обратных задач геофизики является неоднозначность их решения. Это фундаментальное свойство, называемое эквивалентностью, состоит в том, что одному и тому же полю соответствует бесконечно много распределений физического параметра, различающихся существенно между собой, но эквивалентных по полю. Это формально-эквивалентные модели. Их бесконечно много, даже в том случае, если конкретная вычислительная технология построения распределения физического параметра приводит лишь к одному решению. Это может достигаться особенностями алгоритма либо выбором аппроксимирующей модели. Технология, приводящая к построению единственного решения, не сопровождающаяся тщательным геолого-геофизическим осмыслением и увязкой принципов, приводящих к выделению единственного решения, приводит к формально-эквивалентной модели. Получаемая в результате решения обратной задачи формально-эквивалентная модель ни в коем случае не должна рассматриваться как итоговая, но должна быть рассмотрена как трансформация поля в распределение параметра с размерностью физического свойства, результат расчёта поля от которого приводит к исходному полю. Формально-

эквивалентная модель, в отличие от модели эффективного параметра, даже визуально может не напоминать «истинную» и отличаться от неё принципиально во всех отношениях, кроме эквивалентности по полю.

Комплексные модели представляют собой симбиоз различных моделей, приведённых к единому параметру (правильно говорить об интегрированной модели), либо систему содержательных и эффективных моделей.

1.5.2 Модели поля

Модели поля в содержательном отношении определены связями между моделью среды и полем. Что же касается формы, то модель поля может быть дискретной, что включает в себя описание поля в виде дискретных массивов значений, либо аппроксимационной.

Дискретная модель – это простейшая модель, требующая уточнения лишь в том, что означают дискретные отсчёты и куда они отнесены. Параметрами этой модели служат область задания значений, координаты точек.

Аппроксимационная модель поля – это способ его описания с помощью некоторого набора элементарных объектов – например, элементарных полей. Исходное поле, заданное массивом своих значений, заменяется набором элементарных объектов, с небольшим числом параметров – меньшим, чем число элементов массива, но так, что эта совокупность аппроксимирует исходные значения с точностью не хуже заданной. Этим приёмом достигается решение трёх задач: сжатие информации – описание большого числа элементов с помощью небольшого числа параметров; анализ структуры поля по распределению значений параметров аппроксимирующих элементарных полей (это может быть полезным для формирования модели среды); фильтрация и борьба с помехами.

Приведённые способы описания поля могут быть применены для описания, собственно модели физического поля или наблюдаемой, некоторой трансформанты – преобразования поля, которое используется в уравнениях связи и в последующих процедурах реконструкции моделей среды либо атрибутов.

Атрибуты поля – понятие, более всего используемое в сейсморазведке. К атрибутам поля относятся специального типа наблюдаемые, пересчитываемые в параметры модели среды по заданным экспериментально зависимостям. Это собирательное понятие. Для сложных многокомпонентных наблюдаемых атрибуты – это выделенные характеристики поля или его трансформант, которые составляют лишь часть наблюдаемых, используемых далее в специализированной для этих атрибутов технологии анализа. Цель этого анализа – оценка некоторых параметров введённой эффективной модели среды. Именно для ха-

рактеристики этой части используется понятие «атрибут» с последующим его наименованием – например, «атрибуты преобразования Гильберта».

1.5.3 Модель связей

Модель связей представляет собой стержень конструируемого процесса для реконструкции параметров физико-геологической модели по моделям физических полей – решения обратных задач или решения задач моделирования параметров среды. Эти связи предопределяют суть процедур обработки, решения обратных задач и реконструкции модели среды – содержательной либо эффективной. Связи могут быть *детерминированными*, *недоопределёнными и эвристическими*. В свою очередь недоопределённые связи, возникая как результат экспериментальных исследований, имеют форму корреляционностатистических зависимостей – например, в форме уравнений регрессии, либо как функции принадлежности, характеризующие отношение между параметрами, рассматриваемыми как нечёткие величины.

Детерминированные связи имеют вид интегральных, дифференциальных уравнений. Это связи между физическими моделями среды и моделями физического поля – уравнения математической физики. Они составляют вычислительную основу при реконструкции физических моделей и построении формально-эквивалентных моделей.

Недоопределённые связи включают в себя корреляционно-статистические основаны на выявленных корреляционно-регрессионных зависимостях между параметрами среды и атрибутами поля. Нахождение этих связей выполняется методами математической статистики, основанных на понятиях о законах распределения вероятностей. Чаще всего эти законы неизвестны и их искусственное введение является одним из слабых мест статистических приёмов установления регрессионных зависимостей. Недоопределённые связи, основанные на установлении нечётких отношений между параметрами как нечёткими величинами, не требуют априорного представления о вероятностных законах, но требуют априорного задания вида функций принадлежности, характеризующих искомые отношения. Недоопределённые связи используются для построения моделей эффективного параметра, а при дополнительных условиях проверки и корректировки результата моделированием, могут использоваться и для получения содержательных моделей.

Эвристические связи дают широкий простор для конструирования эффективных моделей среды. Типичным и, по-видимому, непревзойдённым по эффективности примером эвристических связей служит метод полного норми-

рованного градиента В. М. Берёзкина. Он основан на том, что эффективный параметр, называемый полным нормированным градиентом гравитационного поля, отображает характеристики среды. Эта эвристическая связь основана на экспериментально установленном факте, состоящем в том, что экстремумы полного нормированного градиента пространственно-приурочены к аномальным зонам в изучаемой физико-геологической модели среды.

Другими примерами эвристических преобразований могут служить многочисленные процедуры параметрической фильтрации поля, основанные на таком же постулируемом предположении.

1.6 Принципы системного анализа при моделировании геологических сред в прикладной геофизике

Первый принцип системного анализа в прикладной геофизике состоит в что геологический объект рассматривается как обобщённая физико-TOM, геологическая модель, содержащая систему своих образов - содержательных интегрированных физико-геологических моделей с присущими им наблюдаемыми функциями геофизических полей, параметрами, отображениями параметров в наблюдаемые, и связями параметров между собой и с параметрами других физикогеологических образов изучаемого объекта. Содержательная интегрированная физико-геологическая модель – это модель распределения соответствующего физичепараметра, согласованная со всем комплексом имеющихся данных, ского связанных с этим параметром. Например, моделью содержательного параметра плотности или плотностной моделью, может служить любое распределение плотности соответствующего наблюдаемому гравитационному полю. Но таких моделей может быть много и это ещё не физико-геологическая плотностная модель. Плотностная модель станет интегрированной плотностной физико-геологической моделью после того, как будет увязана со всем комплексом других данных, связанных с плотностной моделью – например, сейсмическими данными. В этом случае будет получена сейсмо-гравитационная интегрированная плотностная модель. Иерархия этих понятий приведена на рисунке 1.9.

Уже столь общее определение первого системного принципа ведёт к конструктивным результатам, содержание которых будет раскрыто далее, а суть состоит в том, что критерием отбора элементов из класса эквивалентности по наблюдаемой для каждой из содержательных ФГМ может служить принцип подобия различных элементов ФГМ – ведь это различные образы одного и того же объекта. Этим правилом снижается эффект эквивалентности, присутствующий при конструировании сложных физико-геологических моделей.



Рисунок 1.9 – Состав обобщённой физико-геологической модели

Второй принцип системного анализа комплекса геолого-геофизических данных состоит в том, что моделирование наблюдаемых компонент геофизических данных выбранными отображениями, реализуемыми аналитически либо алгоритмически определёнными зависимостями, адекватно природным законам. Этот принцип утверждает, что всякая итоговая содержательная физикогеологическая модель должна соответствовать требуемому уровню приближения своего поля – наблюдаемой, – и найдена в результате процедуры инверсии для этого поля. В результате, процесс её построения должен включать в себя этап построения модели содержательного параметра или решения обратной задачи для соответствующего поля.

Третий принцип системного анализа состоит в том, что все содержательные ФГМ имеют общую историю формирования, определённую историей формирования исходного объекта. Этот принцип означает, что должны существовать эволюционно-динамические законы и управляющие ими геодинамические параметры, которые контролируют развитие объекта от некоторого стартового состояния к современному, соответствующему всем имеющимся наблюдаемым.

Все эти принципы являются конструктивными в том понимании, что приводят к конкретным уравнениям и законам, входящим в постановку задачи системного анализа, в совокупности со своей, определяющей конструктивную группу алгоритмов синтеза, обобщённой физико-геологической моделью. Рассмотрим подробней те конструктивные следствия, которые содержаться в сформулированных принципах системного анализа в прикладной геофизике.

1.6.1 Первый принцип системного анализа 1.6.1.1 Идентификация моделей

В соответствии с первым принципом системного анализа, изучаемый объект рассматривается как система содержательных физико-геологических моделей. Каждая модель имеет свой идентификатор – имя модели.

В перечень содержательных элементов (СФГМ), определяющих обобщённую физико-геологическую модель (ОФГМ), входят:

- группа геологических моделей из СФГМ: $G_i(T_i), i = 1 \div N_G;$

- группа физических моделей из СФГМ: $\Psi_i(M_i), i = 1 \div N_{\Psi}$.

 G_i, Ψ_i можно воспринимать как идентификаторы моделей, а T_i, M_i – их параметризации. N_G, N_Ψ. – число вводимых геологических и физических моделей. Если Ψ_i , G_i , например, – функции пространственных координат или их аппроксимации заданными множествами, то M_i , G_i – параметры, заданием элементов которых конкретизируется элемент из Ψ_i , G_i . Эти параметры носят характер пространственно-распределённых и определяют распределение физического или геологического параметра в пространстве. Например, если $\Psi(M)$ – набор элементарных призматических тел: цилиндры, уступы, призмы, служащие для описания плотностной модели среды, то М – параметры этих объектов, а элемент *m* ∈ *M* характеризует параметры конкретной геометрии призматической конструкции. Другой пример: $\Psi(M)$ – класс скоростных распределений, описываемых непрерывной функцией, локализованной в некоторой области V. Элементами *М* служит распределение пространственных координат из области *V*, и $\Psi(M)$ характеризует множество допустимых функций пространственных координат, аппроксимирующих скоростные неоднородности. В данном случае параметризация $\Psi(M)$ бесконечномерна, и переход к конечномерному случаю осуществляется стандартными средствами вычислительной математики – за счёт использования рядов, сеточных аппроксимаций или их обобщений методом конечных элементов. Особенностью группы физических моделей ($\Psi_i(M_i)$, $i = 1 \div N_{\Psi}$) служит то, что параметры M_i , служащие для конкретного описания их элементов, входят в уравнения и законы, определяющие наблюдаемые геофизические поля либо их атрибуты *u_i*. Физическая модель геологической среды – это модель свойств $\sigma_{\Psi}(m)$, $m \in M$, из $\Psi(M)$ непосредственно поддающиеся измерению физическим экспериментом и отражающихся в изучаемых физических полях $u_i(s)$, имеющих носитель S, $s \in S$.

К группе геологических моделей $G = G_i(T_i)$ из ФГМ относятся, в частности, литологическая $G_1(T_1)$, стратиграфическая $G_2(T_2)$, тектоническая, структурно-геологическая, фациальная и так далее. Конкретный перечень и параметризация устанавливаются с учётом объективных данных, ограничивающих доступную информацию об этих моделях. Особенностью группы геологических моделей служит отсутствие прямых отображений параметров T_i из её группы в наблюдаемые геофизические поля. Геологическая модель $g_G(t)$, $t \in T$ из G(T) не имеет непосредственного отображения в физических полях. Включается в предмет рассмотрений в связи с наличием опосредованных связей геологические зависимости.

1.6.1.2 Связи в физико-геологических моделях

Совокупность содержательных ФГМ (СФГМ) относится к единому объекту, что проявляется не только в общем принципе подобия, но и в наличии взаимосвязей между параметрами, характеризующими элементы СФГМ. Связи между параметрами модели разделяются на внутренние – устанавливающие ограничения и связи между различными компонентами внутри одной и той же модели, и внешние – связи между параметризациями для различных моделей.

Внутренние связи включают в себя:

- ограничения типа неравенств на значения параметров $(\cdot)_{\perp}^{-}$, например, M_{\perp}^{-} ;

- уравнения взаимозависимостей или меры подобия (например, корреляции) между различными компонентами параметров $R(\cdot)$. Например, задание матрицы корреляций между различными границами одной и той же структурной модели;

- ограничения диапазона допустимых значений: Im $M \in \sigma_i$. Здесь $\sigma = \{\sigma^j, j = 1,...\}$ либо конкретное значение, либо интервал значений параметра $\sigma_{\Psi}(v)$. Например, плотность геологических объектов в изучаемой области может принимать значения: 2.3; 2.56; 2.6–2.65; 2.8. Легко понять, что это совсем иное, чем ограничения типа неравенств. Такие ограничения следует вводить в случаях, когда известны классы допустимых объектов, но неизвестно их место расположения. Эти ограничения записываем в форме Im $M \in M_{\sigma}$.

Внешние связи заданы между параметрами различных компонент ОФГМ. Выделяют:

- функциональные зависимости;

- корреляционно-регрессионные зависимости;

- отношения между функциями принадлежности для нечётких множеств. Все они формально выражаются в виде принятия системы зависимостей:

$$\Xi_J [\sigma_{\Psi}, g_G] = 0, j = 1, \dots, N_{\Xi}; \tag{1.1}$$

Особо следует обратить внимание на ту часть из них, которые, обеспечивая зависимости между геологическими и геофизическими параметрами, дают возможность реконструировать параметры геологических моделей g_G по заданным физическим σ_{Ψ} моделям.

В той части геолого-геофизических параметров, в которой такие зависимости существуют, возможна постановка задачи геологической интерпретации геофизических данных – реконструкция геологической модели среды по наблюдаемым геофизическим полям. Всякая неопределённость такого прогноза означает принципиальную неопределённость, не прогнозируемость компонент геологической модели. В этой связи, установление обозначенных геологогеофизических связей эквивалентно обоснованию возможности геологической интерпретации геофизических данных. Установление таких связей осуществляется, в том числе, с привлечением аппарата обучения на контрольных, тестовых объектах.

Ещё одним существенным следствием первого системного принципа служит сам факт существования единого прообраза для всех содержательных физико-геологических моделей. Если существование отображений одних параметров в другие позволяет выразить одни через другие, за счёт чего существенно снизить неоднозначность задачи реконструкции моделей, то в их отсутствии такая последовательность действий неприемлема. Она может оказаться неприемлемой и в том случае, когда эти связи установлены, но с большими погрешфактически, ностями. что, всегда имеет место, И последующим распространением этих погрешностей на результат реконструкции.

Вместо использования отображений одних параметров в другие первый принцип системного анализа позволяет воспользоваться критерием близости разноплановых содержательных ФГМ как различных образов одного и того же объекта. Это схематично изображено на рисунке 1.10.

Факт подобия может быть выражен принятием функционала качества подобия – критерия оптимальности, имеющего в общем случае вид:

 $J[\sigma_{\Psi}, g_{\rm G}] \rightarrow \min. \tag{1.2}$

Его минимизация – обязательный элемент системной инверсии геофизических данных. Устанавливая подобие, тем самым происходит автоматическое доопределение задачи инверсии до задачи с единственным решением.



Рисунок 1.10 – Подобие ФГМ (по материалам А. П. Петровского)

1.6.2 Второй принцип системного анализа

В соответствии со вторым принципом системного анализа, физически содержательные элементы ОФГМ должны соответствовать наблюдаемым компонентам геофизических полей.

Требование адекватности операторов состоит в том, что используемые операторы A_i расчёта геофизических полей $u_i(s)$ адекватны природным законам. Обеспечивают вычисление атрибутов поля и реализованы аналитически либо алгоритмически. В значительном числе случаев эти природные отображения в несколько идеализированной форме носят характер интегральных либо дифференциальных уравнений, и следствий из них, связанных со спецификой применяемой аппроксимационной конструкции. Тем не менее, допустимы и некоторые эвристические соотношения, например, регрессионного типа, если есть обоснование их адекватности целям расчёта.

В значительном числе случаев, в качестве такого исходного интегрального уравнения может использоваться представление решения дифференциального уравнения в виде интеграла от функции Грина: $G(t, \tau, v, \xi)$:

$$\int_{t_0}^{t} \int_{V} G(t,\tau,\xi) \sigma(\xi) d\xi d\tau = u(t,v), \qquad (1.3)$$

где u(t, v) – расчётное нестационарное физическое поле. Последнее уравнение существенно упрощается в случае инвариантности исходного (1.3) относительно пространственных и временных сдвигов. В этом случае функция Грина зависит лишь от двух переменных: *t*, *v* и уравнение (1.3) принимает вид:

$$\int_{t_0}^t \int_V G(t-\tau,s-\xi)\sigma(\xi)d\xi d\tau = u(t,s).$$

Для стационарного случая, интегральное представление Грина вырождается в преобразование вида:

$$\int_{V} G(v,\xi)\sigma(\xi)d\xi = u(s).$$
(1.4)

Следует заметить, что (1.4) – это общее выражение для линейного ограниченного (вполне непрерывного) оператора в Гильбертовом пространстве.

Эти уравнения можно записать в операторной форме $A_i[\sigma(v)] = u(s)$, где v – параметр характеризующий носитель для σ , и V – область определения для $\sigma(v)$. u(s) – наблюдаемая компонента поля, зависящая от переменной s, которая может иметь как непрерывный, так и любой иной диапазон значений. Например, u(s) может быть задано для отдельных значений s_i . В том случае, если наблюдаемое поле нестационарно, под параметром *s* понимается пространственно-временной параметр s = (t, s). Если для $\sigma(v)$ введена некоторая аппроксимация системой параметров M, например, $\sigma(v)$ заменено действием системы призм аппроксимирующих $\sigma(v)$ и M – группа параметров этих призм. Конкретный элемент задаётся определением значений *т* параметров из *М*. Подставляя эту аппроксимацию в (1.4), получаем уравнение $A[\sigma(m)] = u(s)$ для измеряемой величины во введённой параметризации. В других случаях эти зависимости носят эмпирический характер и установлены на основе анализа конкретных данных для конкретного района исследований. Тем не менее, принятие этих уравнений является внешним относительно процедуры последующей инверсии. Тем не менее, допустимыми являются ситуации, когда после завершения этапа инверсии полей, по его результатам уточняются процедуры отображения параметров модели среды в поле. Типичным примером такого рода ситуации слув процессе инверсии гравиметрических данных компонент жит учёт регионального фона, которые уточняются по итогам выполненной инверсии и с учётом этого уточнения процедура инверсии может быть повторена.

Уравнения, связывающие параметры физических компонент моделей σ_{Ψ} и соответствующие им наблюдаемые компоненты физических полей $u_{\Psi} = \{u_{\Psi i} = u_i, i = 1 \div N_{\Psi}\}$, заданы цепочкой операторных соотношений:

$$\mathbf{A}[\boldsymbol{\sigma}_{\Psi}] = \mathbf{u}_{\Psi} : A_i[\boldsymbol{\sigma}_i] = u_i,$$

$$i = 1 \div N_{\Psi}.$$
 (1.5)

Для удобства письма здесь и далее обозначим $\sigma_i = \sigma_{\Psi}$. То же относится и к геологическим моделям: $g_i = g_{Gi}$.

Приведённые операторные соотношения называются операторами прямой задачи. Их можно трактовать как суперпозицию уравнений математической физики, ответственных за рассматриваемые физические законы и преобразования физических полей в интерпретируемые атрибуты поля – наблюдаемые. Эти последние преобразования условно называются эталонирующими.

1.6.3 Третий принцип системного анализа

В соответствии с третьим принципом системного анализа геологогеофизических данных все содержательные ФГМ имеют общую историю формирования, определённую историей формирования исходного объекта. Этот принцип означает, что должны существовать эволюционно-динамические законы и управляющие ими геодинамические параметры, которые контролируют развитие объекта от некоторого стартового состояния σ^0_{Ψ} к современному, соответствующему всем имеющимся наблюдаемым. Развитие этого положения ведёт к кон-И эффективным технологиям. Эволюционноструктивным результатам динамические уравнения содержат параметр эффективного времени to, вдоль которого происходит развитие системы, динамически изменяющуюся модель $\sigma_i(t, v)$ с известным стартовым состоянием $\sigma_i(0, v) = \sigma_i^0(v)$, динамические параметры, управляющие процессом развития, например, векторы скорости движения вязкого массива. Уравнение движения, в частности, можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}\sigma_{i}(v,t) = D_{i}\left[\sigma_{i}(v,t),\mathbf{d}_{i}\right];$$

$$\sigma_{i}(v,0) = \sigma_{i}^{0}(v).$$
(1.6)

Конкретная форма такого уравнения для изучения поведения структурных моделей, представляющих собой систему уравнений для глубин залегания границ: $z = f(s) = \{z = f_0(s), z = f_1(s), ..., z = f_N(s)\}$, зависящих от горизонтальных координат $s = \{x, y\}$, с известным распределением физического параметра $\Delta\sigma(x), x = \{s, z\}$ между ними имеет вид:

$$\frac{\partial \mathbf{f}(s,t)}{\partial t} = \mathbf{W}(s,t) - \left\langle \mathbf{V}(s,t) \middle| grad(\mathbf{f}(s,t)) \right\rangle + F(\mathbf{f}(s,t)) + \Psi;$$
$$\mathbf{f}(s,t) \middle|_{t=0} = \mathbf{f}^{0}(s), \qquad (1.7)$$

где $z = \mathbf{f}(s,t) = \{z = f_0(s,t), z = f_1(s,t), ... z = f_N(s,t)\}$ – зависящие от условного времени *t* границы (определение – поток вещества через границы отсутствует); W(s, t) – вертикальные составляющие скорости перемещений границ; V(s, t) – векторы горизонтальных составляющих скоростей перемещений границ; F(f(s, t)) – оператор, ответственный за модель денудации рельефа; Ψ – сложная функция, ответственная за дивергентную компоненту в эволюции системы и определяемая особенностями процессов осадконакопления и метаморфизма. Она зависит от большого числа факторов, включая реологические свойства пород. Однако, именно в силу сложности, равнозначной многофакторности, среди которых нельзя выделить главные, эту компоненту следует рассматривать как отдельное аддитивное слагаемое, определяемое по результатам соответствия моделирования динамических процессов и сопоставления результатов с наблюдаемыми физическими полями. Дополнение этих динамических уравнений требованием стремления поля от итоговой – конечной в развитии – модели к наблюдаемой, дополняет динамический принцип гравитационного поля как конечного условия, доопределяющего параметры движения системы:

$$\lim_{t \to t_k} A[\mathbf{f}(s,t)] \to u(s).$$
(1.8)

Условная модель динамики плотностных границ с соответствующей динамикой гравитационного поля, приведена на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Динамика структурной модели и соответствующего гравитационного поля от стартового (слева) с несоответствующим наблюдаемому современному полю до современного (справа), соответствующего наблюдаемому полю

Эволюционно-динамические уравнения обозначаем:

$$D_{j}[\boldsymbol{\sigma}_{\Psi}, \boldsymbol{g}_{G}, \boldsymbol{d}];$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\Psi}(0) = \boldsymbol{\sigma}^{0}_{\Psi}, \boldsymbol{g}_{G}(0) = \boldsymbol{g}^{0}_{G}.$$

$$j = 1, \dots N_{D}.$$

(1.9)

где **d** – геодинамический параметр, который, в частности, может совпадать с одним из компонентов физической модели ФГМ.

Отличие в записи между (1.6, 1.7) и (1.9) состоит лишь в том, что в (1.9) подчёркивается, что компоненты эволюционных законов могут и не иметь форму дифференциальных уравнений, а лишь устанавливать подобие одних компонент $\Phi\Gamma M$ с другими, динамика которых рассматривается. Но в частном случае можно (1.9) рассматривать как (1.6), либо (1.7). Кроме того, подчеркнём различие между (1.9) и (1.1). Она состоит в том, что (1.1) – это алгоритмически

определённый закон, в соответствии с которым по заданному состоянию одних элементов $\Phi\Gamma M$ можно сузить, а в исключительных случаях сильно сузить класс допустимых моделей для других компонентов $\Phi\Gamma M$, в то время как (1.9) есть уравнение развития компонент $\Phi\Gamma M$ модели во времени, начиная с некоторого начального состояния σ^0_{Ψ} , g^0_G до современного, соответствующего наблюдаемым геофизическим полям. Развитие происходит в соответствии со значениями геодинамических параметров *d* связанными для всех компонент $\Phi\Gamma M$, входящих в систему геодинамических уравнений. Взаимозависимость этих параметров для разных элементов $\Phi\Gamma M$ и есть то, что объединяет различные компоненты $\Phi\Gamma M$ в систему взаимоувязанных единым генезисом объектов.

1.7 Системная инверсия и декомпозиция

Итогом выполненного системного анализа данных в соответствии с тремя сформулированными принципами системного анализа служит формулировка задачи реконструкции компонент ФГМ. В неё входят: компоненты разноплановых моделей геологического объекта; выявленные взаимозависимости между ними; установленные операторы прямой задачи; сформулированные критерии близости различных представлений компонент модели; эволюционнодинамические принципы формирования изучаемого объекта:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\Psi}} = \left\{ \boldsymbol{\sigma}_{i} = \boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\Psi}_{i}} \in \boldsymbol{\Psi}_{i} \left(\boldsymbol{M}_{i} \right), i = 1 \div \boldsymbol{N}_{\boldsymbol{\Psi}} \right\}.$$
(1.10 a)

$$\mathbf{g}_{\mathbf{G}} = \left\{ g_{i} = g_{G_{i}} \in G_{i}(T_{i}), i = 1 \div N_{\mathbf{G}} \right\}$$
(1.10 б)

$$\Xi_{j} \left[\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\Psi}}, \boldsymbol{g}_{\mathbf{G}} \right] = 0 \tag{1.10 b}$$
$$j = 1, \dots N_{\Xi}.$$

$$\mathbf{A}[\boldsymbol{\sigma}_{\Psi}] = \mathbf{u}_{\Psi} : A_i[\boldsymbol{\sigma}_i] = u_i, i = 1 \div N_{\Psi}$$
(1.10 г)

$$D_{j} \Big[\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\Psi}}(t), \boldsymbol{g}_{\mathbf{G}}(t), \boldsymbol{d} \Big];$$

$$i = 1 \quad N \qquad (1 \ 10 \ \pi)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\Psi}}(0) = \boldsymbol{\sigma}^{0}_{\boldsymbol{\Psi}}, \boldsymbol{g}_{\mathbf{G}}(0) = \boldsymbol{g}^{0}_{\mathbf{G}}.$$

$$I[\boldsymbol{\sigma}_{\Psi}, \boldsymbol{g}_{G}] \to \min.$$
 (1.10 e)

Эта задача называется задачей системной инверсии и состоит в нахождении системы взаимоувязанных моделей, синтезирующим элементом которой (системы) служат связи между параметрами и принцип подобия моделей, следующий из первого системного принципа.

Решения задачи системной инверсии основаны на *методе декомпозиции* сложной задачи к системе более простых.
Компонентами результатов декомпозиции общей задачи системной инверсии с целью построения содержательных ФГМ служат (рис. 1.12):

- Аппроксимационный принцип.

Традиционные задачи подбора решений на заданном модельном классе. Этот принцип лежит в основе традиционных методов подбора. Они восходят к работам А. А. Юнькова (1958), Е. Г. Булаха (1964), после чего число разновидностей этих методов возрастало лавинообразно. По меткому выражению В. Н. Страхова: «... Росли как грибы после летнего дождя, отличаясь иные на є, а иные на б». Их особенностью является формирование модельных классов как множеств единственности для заданного операторного уравнения с последующим подбором элемента на модельном классе из принципа минимума невязок.

- Критериальный принцип.

Нахождение оптимальных относительно заданного критерия оптимальности $J[\sigma, g]$ решения обратной задачи. Этот критериальный подход лежит в основе методов нахождения оптимальных решений обратных задач. В качестве модели, которая служит нулевым приближением, выбирается геологическая модель g, a в конструкцию функционала J входит дополнительная информация о равнозначности данных, на основе которых строилось нулевое приближение, и учёт специфических аналитических свойств нормальных решений. Предварительного сужения операторного уравнения на класс единственности не делается. Эквивалентность, по сути, используется для оптимизации решения относительно заданной *геологической модели* g.

- Согласованно-критериальный принцип.

Нахождение системы взаимоувязанных принципом подобия $J[\sigma_i, \sigma_i] \rightarrow \min$ решений нескольких (двух и более) операторных уравнений. Этот согласованнокритериальный принцип лежит в основе методов комплексной интерпретации, понимаемых как совместное решение системы обратных задач, доопределённых критериальным принципом. Наиболее распространённый частный случай такой постановки – это нахождение в результате согласованной инверсии структурных задач гравиметрии и сейсморазведки. Реализация основана на итерационном решении последовательности обратных задач сейсморазведки и гравиразведки, в котоприближением каждого рых начальным следующего шага (например, сейсмического) служит результат решения обратной задачи на предыдущем (например, гравиметрическом). Этот итерационный процесс надлежащим выбором параметров приводится к сходящемуся.

- Эволюционно-динамический принцип.

Лежит в основе одноимённых методов построения решений обратных задач с использованием информации о генезисе изучаемых объектов, состоящих в рассмотрении эволюционно-динамического развития модели от некоторой стартовой до текущей, соответствующей измеряемому современному полю. Особенностью служит использование поля в эволюционных уравнениях как конечного условия, доопределяющего частично неизвестные геодинамические параметры, управляющие процессом движения. Сама задача эволюции расчленяется на последовательность подзадач сдвигового и дивергентного развития модели. Их последовательная реализация приводит к конструктивным приёмам построения результирующей, согласованной с полем модели.



Рисунок 1.12 – Схема декомпозиции задач системной инверсии

1.8 Синтез интегрированной ФГМ

Синтез результатов решений задач инверсии как элементов декомпозиции задачи системной инверсии основан на изучении сходимости процедур и наряду с формальным анализом контроля сходимости включает в себя и неформальный, основанный на группировании результатов и их визуальном анализе.

Выполняя группирование, следует убедиться в том, что последовательность решений сходится. Нет универсальных доказательств сходимости, но для некоторых частных задач, служащих эталоном, такие доказательства могут быть построены и взяты за основу в более общих и сложных случаях. Рассмотрим подзадачу о нахождении системы взаимоувязанных принципом подобия $J[\sigma_i, \sigma_j] \rightarrow \min$ решений нескольких (двух и более) операторных уравнений. Для примера рассмотрим вопрос о согласованном построении двух физических компонент ФГМ в рамках синтетической критериальноаппроксимационной формулировки задачи инверсии. Геологическая компонента ФГМ отсутствует и в паре физических моделей её роль играет одна из них. Рассматривается система задач:

$$J[\sigma_1, \sigma_2] \rightarrow \min,$$

$$A_1[\sigma_1] = u_1,$$

$$A_2[\sigma_2] = u_2,$$

$$\sigma_i \in M_i, i = 1, 2.$$

(1.11)

Для её решения строится итерационная последовательность:

$$\sigma_1^{i+1}: J\left[\sigma_1^{i+1}, \sigma_2^i\right] = \min_{\xi \in M_1 \cap \Omega_{u_1}(A_1)} J\left[\xi, \sigma_2^i\right];$$

$$\sigma_2^{i+1}: J\left[\sigma_1^{i+1}, \sigma_2^{i+1}\right] = \min_{\xi \in M_1 \cap \Omega_{u_1}(A_1)} J\left[\sigma_1^{i+1}, \xi\right].$$

Здесь $\Omega_{u_i}(A_i) = \sigma_1 : A_i \sigma_i = u_i$. Легко видеть, что эта итерационная последовательность монотонно сходится относительно функционала:

$$J\left[\right]: J\left[\sigma_1^i, \sigma_2^i\right] \leq J\left[\sigma_1^{i+1}, \sigma_2^i\right] \leq J\left[\sigma_1^{i+1}, \sigma_2^{i+2}\right].$$

Если последний сильно выпуклый, например:

$$J\left[\xi,\eta\right] = \left\|\xi-\eta\right\|_{X},$$

где *X* – сильно выпуклое банахово пространство, и на некотором шаге *i* неравенство выполнено как равенство: $J[\sigma_1^i, \sigma_2^i] = J[\sigma_1^{i+1}, \sigma_2^i]$, то $\sigma_1^{i+1} = \sigma_1^i$ и процесс сошёлся. В противном случае он будет продолжать монотонно сходиться. В приведённом примере предполагается, что модели σ_1 и σ_2 имеют одинаковую физическую размерность, что достигается, например включением в функционал процедуры проектирования Ψ_1 на Ψ_2 , что эквивалентно проектору $P_X(\Psi_2, \Xi, \sigma_1): J[P_X(\Psi_2, \Xi, \sigma_1^i), \sigma_2^i].$

Этот приём доказательства сходимости достаточно просто обобщается на другие классы задач.

Важно отметить лишь, что сходимость будет иметь место относительно норм, эквивалентных введённому функционалу качества, – мере уклонения двух моделей.

2. Программно-алгоритмическое обеспечение интегрированного системного анализа данных гравиразведки

2.1 Системный подход к организации программно-алгоритмического обеспечения и физико-геологических данных

Разработанная технология создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды обеспечивает создание интегрированных физико-геологических моделей на основе развитых теоретических положений системного анализа геолого-геофизических данных и, в частности, реализует вычислительные схемы включаемые в технологию системной инверсии. Она позволяет применить современные алгоритмы обработки данных полевых и скважинных исследований, а также объединить функциональность ряда программных продуктов, при помощи которых решаются задачи интегрированной интерпретации физико-геологических данных. Создание комплекса программных модулей, объединённого общей базой данных, призвано обеспечить полноценное плоское и трёхмерное геолого-геофизическое моделирование месторождений углеводородов без издержек на конвертирование и передачу данных, а также позволяет проводить интерпретацию геофизических данных.

Технология моделирования физико-геологических сред включает в себя не только программные компоненты, обеспечивающие построение физико-геологических моделей, решение прямых и обратных задач, но и сопровождается подробным описанием приёмов и методов моделирования, основанных на системе принципов создания, поддержки и инверсии физикогеологических моделей (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Компоненты технологии моделирования физико-геологических сред

Таким образом, разрабатываемая технология представляет собой систему взаимосвязанных компонентов различного уровня. При таком подходе вполне естественно, что связи этих компонентов сами по себе выступают в качестве важных объектов рассмотрения.

Следующие основные свойства и функции были определены на ранней стадии работы над интегрированной средой физико-геологического моделирования:

1) Общее хранилище физико-геологических данных

Для взаимодействия модулей разрабатываемого комплекса программ без издержек на передачу и конвертацию данных создано общее хранилище данных. Оно позволяет хранить и использовать данные геофизических исследований (геофизические поля, оцифрованные профиля, скважинные кривые), опорные данные для построения моделей (структурные границы и параметры моделей), а также результирующие двумерные и трёхмерные модели.

2) Импорт и экспорт физико-геологических данных

Для взаимодействия с другими системами, являющимися поставщиками данных (GCIS, планшеты скважинных исследований, инженерные программные пакеты, программы оцифровки и другие), или служащими для дальнейшей обработки данных (Surfer, CorelDraw и пр.), в разрабатываемый комплекс программ включён набор инструментов для чтения и записи данных геофизических исследований и физико-геологических моделей в ряд специализированных форматов.

3) Редактирование и трансформация моделей

Редактирование и трансформация моделей в соответствии с новыми данными исследований или знаниями эксперта являются основной целью создания данной технологии. Это значит, что пользователю предоставляется набор удобных инструментов для изменения структуры и параметров физикогеологической модели. В нашем случае они обеспечивают поддержку эволюционно-динамических принципов для формирования структур, близких к реальной геологической среде.

4) Решение прямых задач геофизических методов

Поскольку геофизические поля являются основным критерием соответствия физико-геологической модели реальной среде, в программном комплексе присутствуют инструменты для решения прямых содержательных задач геофизики. Они служат как для визуального контроля моделей, сопоставления наблюдённых и рассчитанных полей и нахождения невязки, но и используются при итерационной геофизической инверсии моделей. Комплекс программ должен позволять решать прямые задачи гравиразведки, электроразведки, сейсморазведки и электроразведки.

41

5) Создание комплексной физико-геологической модели и поддержка её актуальности

В едином пространстве данных можно вести речь о комплексной физикогеологической модели среды (рис. 2.2). Она формируется для объекта исследований на основе опорных данных с помощью алгоритмов построения модели, включающих процедуры интерполяции, расчёта значений параметров в произвольной точке, преобразования пространственных координат и алгоритмы создания полноценной трёхмерной модели. При включении в модель новых данных происходит частичный или полный (в зависимости от вида данных) пересчёт модели, проверка и увязка параметров. Из комплексной модели можно выделить произвольный слой или срез для получения частной модели и экспорта в один из форматов.



Рисунок 2.2 — Работа с комплексной физико-геологической моделью

6) Применение эволюционно-динамических принципов для решения обратных задач геофизики

В основе эволюционно-динамических принципов инверсии геофизических данных, как это описано в разделе 1.7, лежит предположение о том, что искомая модель с распределёнными параметрами или её частный случай (система границ) претерпевали в процессе своего формирования трансформации из некоторого начального состояния в конечное, описываемые на фрагментах непрерывного развития уравнениями движения. Обязательным условием служит требование того, чтобы в конечном пункте этих трансформаций складывающихся из непрерывных движений и некоторых «ручных» геодинамических движений моделирующих появление новых объектов, поле итоговой модели соответствовало заданному.

7) Интерполяция данных на основе геофизической инверсии

Обычно для интерполяции и экстраполяции данных в подобных программных комплексах используются заранее определённые стохастические алгоритмы, не учитывающие априорные геологические данные и геофизические поля. В данном проекте созданные алгоритмы и программное обеспечение позволяет выполнять взаимную увязку и аппроксимацию интегрированных моделей на основе геофизической инверсии.

8) 2D- и 3D-визуализация моделей физико-геологической среды

Поскольку современные технологии интерпретации и моделирования подразумевают возможность работы с полноценной трёхмерной моделью, в комплекс включена возможность отображения двумерных и трёхмерных структурно-параметризованных моделей исследуемых объектов, а также сеточных моделей, моделей структурных карт, карт профилей, а также трёхмерных и двумерных моделей геофизических полей.

Общая структура созданной интегрированной среды изображена на рисунке 2.3. 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 [3] 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. Некоторые из этих модулей уже разработаны и опробованы (модуль инверсии гравитационных полей на основе эволюционно-динамических принципов, экспресс-конструктор структурноплотностных моделей с динамическим расчётом гравитационного эффекта), некоторые находятся на стадии проектирования и разработки.





физико-геологического моделирования

Трёхмерное моделирование производится с помощью программного редактора физико-геологических моделей GeoVIP [4]. Также он позволяет производить интерполяцию и согласование двумерных и трёхмерных данных, применять геодинамические модификаторы к геометрии моделей, решать прямую задачу гравиметрии для двумерного и трёхмерного случая, а также интерполировать геометрию и параметры модели на основе решения обратной задачи гравиметрии. Подробно функции редактора GeoVIP описаны ниже в данной главе.

Потоки данных в интегрированной среде физико-геологического моделирования изображены на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Потоки данных в интегрированной среде физико-геологического моделирования

2.2 Хранение и передача физико-геологических данных

Основным источником опорных данных для построения двумерных моделей профилей и трёхмерных 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 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Структура файловых данных системы

Основой интегрированной среды служит реляционная база данных для хранения иерархии исследований, результатов исследований, расчётов и параметров моделей (рис. 2.6). Для поддержки базы данных используется реляционная СУБД, 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 геологогеофизической среды.

2.3 Описание компонентов интегрированной среды физикогеологического моделирования

2.3.1 Программный комплекс создания и поддержки трёхмерных физико-геологических моделей GeoVIP

Разрабатываемые в рамках проекта программные модули призваны обеспечить работоспособность созданных вычислительных схем и алгоритмов интегрированной инверсии на современном технологическом уровне. Для построения и поддержки актуальности моделей сложнопостроенных сред, позволяющих корректировать и взаимно увязывать изменения распределённых параметров литосферы, был создан программный комплекс физикогеологического моделирования GeoVIP.



Рисунок 2.6 – Фрагмент логической схемы отношений данных программного комплекса

Он имеет геофизическую направленность и предназначен для анализа и интерпретации результатов геофизических исследований, построения моделей среды и поддержки их актуальности за счёт взаимной увязки данных и корректировки геолого-геофизических моделей на основе оптимальных решений обратной задачи [4, 5]. Комплекс позволяет применять современные алгоритмы работы с данными полевых и скважинных исследований, а также объединяет функциональность ряда программных продуктов, разработанных в том числе и в Ухтинском государственном техническом университете, а также обеспечивает полноценное плоское и трёхмерное физико-геологическое моделирование месторождений углеводородов без издержек на конвертирование и передачу данных, а также позволяет проводить интерпретацию геофизических данных.

Комплекс GeoVIP представляет собой набор функциональных модулей, взаимосвязанных на уровне базы данных и общей программной оболочки (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Модули программного комплекса GeoVIP

В блоке описания структуры базового модуля вводятся пользователем все исследуемые геологические объекты (профиля, пласты, структурные карты и другие) с обозначением проведённых исследований (структурно-плотностные модели, сейсмические разрезы по профилям, электрометрические модели, скважинные исследования и прочие) по этим объектам. После этого происходит заполнение этих элементов данными и сохранение их в едином хранилище данных для дальнейшей обработки, а также проведения необходимых операций над ними.

Структурно-плотностное моделирование

В рамках данного модуля реализованы инструменты ввода данных и параметров моделей, обработки и визуализации для структурных геологогеофизических моделей сред (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Визуализация 2D-профиля в GeoVIP на примере гряды Чернышёва – структурно-плотностная модель с обозначениями горизонтов

В модуль структурно-плотностного моделирования также включён инструмент для работы с картой профилей исследуемой области (рис. 2.9). Он позволяет определить взаимное расположение профилей в пространстве на карте исследуемой области и задать пикеты для разбиения профилей на участки.

В комплекс включена возможность отображения и редактирования трёхмерных структурно-плотностные моделей исследуемых объектов, а также других моделей с распределёнными параметрами. Для получения объёмной модели исследуемой площади загружается набор структурных карт и задаются характеристики среды.



Рисунок 2.9 – Редактирование карты профилей

Реализован гибкий механизм отображения объектов, позволяющий выбирать те структуры, которые необходимо отобразить для текущей модели без постоянных затрат времени на создание и пересчёт трёхмерных объектов. Имеются также механизмы масштабирования объектов и вращения камеры, инструменты наложения структурных и равномерных сеток, а также возможность «взгляда внутрь пласта» (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Трёхмерная визуализация аномальной зоны распределения плотностей, имеющий интерес для поиска УВ в пределах геофизического месторождения

Также в рамках данного модуля разработаны и включены в программный комплекс алгоритмы интерполяции структурных границ и распределения параметра для трёхмерной 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 трёхмерного случая.

Электрометрическое моделирование

Модуль электрометрического моделирования позволяет создавать и редактировать модели изучаемых объектов с распределёнными параметрами проводимости (рис. 2.11). Модуль рассчитывает тензоры магнитотеллурического импеданса для таких моделей. В редакторе применены алгоритмы расчёта и метод построения электрометрической модели, разработанные сотрудником УГТУ Геннадием Жарким. Разработанная им библиотека алгоритмов также позволяет рассчитывать производную Фреше для моделей с распределёнными электрометрическими параметрами и решать обратную задачу магнитотеллурического зондирования в критериальной постановке [6].



Рисунок 2.11 – Простой случай включения проводящего объекта в слабопроводящую среду, а также рассчитанные характеристики тензора магнитотеллурического импеданса

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 сообразно некоторому физическому закону.

Скважинное моделирование

В разработанный программный комплекс GeoVIP включён 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. 2.12). В настоящее время в тестовом режиме отлаживается подсчёт запасов углеводородов по следующей схеме:

- 1) загрузка траекторий скважин;
- 2) загрузка структурных поверхностей;
- 3) загрузка данных по скважинам;
- 4) численная оценка ресурсов и подсчёт запасов по изучаемой территории.



Рисунок 2.12 – Трёхмерная визуализация траекторий скважин и распределения параметра нефтенасыщенности

Итак, на данном этапе разработки программный редактор создания и поддержки геолого-геофизических моделей GeoVIP обеспечивает:

1) Импорт данных (данных исследований, исходных параметров моделей, потенциальных полей, характеристик моделей) из основных форматов хранения геолого-геофизических данных (GRID, ASCII GRID, dat, файлы системы GCIS [3], а также скважинных исследований (LAS). 2) Хранение данных геофизических исследований, введённых и рассчитанных параметров моделей, а также геофизических полей в едином пространстве данных.

3) Отображение и редактирование плоских моделей структуры и распределения параметра по профилям, схемы профилей на модели изучаемой площади, структурных карт в формате GRID, а также трёхмерных структурноплотностных моделей изучаемых объектов.

4) Формирование согласованных трёхмерных моделей, включая разломные структуры.

5) Интерполяция геометрии и параметров трёхмерной модели по данным 2D-моделей профилей.

6) Расчёт распределения параметра для двумерной и трёхмерной моделей изучаемого объекта, а также по произвольному разрезу.

7) Расчёт прямой и обратной задачи гравиметрии для трёхмерных структурно-плотностных моделей.

8) Расчёт прямой и обратной задачи электрометрии для трёхмерных сеточных моделей.

9) Экспорт моделей и результатов расчётов в файлы для дальнейшей обработки (файлы системы GCIS, grd, dat, графические форматы).

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

2.3.2 Программное обеспечение построения нулевых приближений и решения прямой задачи гравиразведки для двумерных моделей

Программный модуль Playground, разработанный в лаборатории математического моделирования УГТУ (авторы: Кобрунов А. И., Барабанов М. И.), используется для построения начальных приближений, служащих основой для последующего решения задачи инверсии данных гравиразведки в системной постановке. Playground предназначен для:

- построения нулевого приближения двумерных структурно-плотностных моделей по графическим изображениям;

- моделирования структуры геологического разреза;

- аппроксимации плотностных неоднородностей набором элементарных тел;

- решения прямой задачи гравиразведки;

- оценки невязки вычисленного и наблюдённого гравитационного эффекта;

- экспорта результатов обработки.

53

В качестве начальных данных используется графическое представление результатов различных исследований, дающих первичные сведения о строении земной коры на исследуемом профиле. Для уточнения плотностных неоднородностей построенной структурной модели и минимизации невязки создан динамический конструктор плотностной модели, позволяющий аппроксимировать плотностные неоднородности набором элементарных тел: прямоугольником (бесконечной прямоугольной призмой), эллипсом (бесконечным эллиптическим цилиндром), уступами (рис. 2.13–2.14).



Рисунок 2.13 – Аппроксимация модели телами простой формы в Playground



Рисунок 2.14 – Моделирование геологического разреза над рифогенной постройкой в Playground. Прямая структурная задача гравиразведки

2.3.3 Математическое и программное обеспечение технологии эволюционно-динамических трансформаций и инверсии на основе ЭДП

Эволюционно-динамическое моделирование состоит в воспроизведении и изучении той части эволюционных процессов в изучаемом участке литосферы, которая связана с динамикой элементов, входящих в состав изучаемой литосферной системы. За кругом рассмотрения остаются очень важные аспекты, не относящиеся прямо к движению вещества, и в этом состоит ограничение круга рассматриваемых в эволюционно-динамическом моделировании процессов. Тем не менее, включение элементов эволюционно-динамического моделирования в процедуры инверсии геофизических данных, в частности решения обратных задач гравиметрии позволяет повысить информативность интерпретационных процедур интегрированного анализа данных, обеспечить единственность задач инверсии за счёт активного вовлечения в вычислительный процесс данных о динамическом генезисе изучаемых объектов и динамических процессов, приведших к их формированию.

Постановка задач инверсии геофизических данных на основе использования уравнений движения для изучения пространственно-распределённых параметров $\sigma(v)$ плотности и динамики геометрических характеристик слоистого разреза, представленных в виде системы структурных поверхностей, описываемых векторнозначной функцией $\mathbf{f}(s) = \{f_i(s), i = 0 \div N\}$, приведена в работах [7, 8]. Сущность подхода состоит во введении уравнений движения для распределённых параметров и системы поверхностей, управляемых геодинамическими параметрами, к числу которых относятся скорости дилатации, сдвиговых деформаций и другие. Эти геодинамические параметры, определяющие конкретный сценарий развития системы для каждого района известны лишь весьма приближённо. Включение эволюционно-динамических принципов в эти уравнения задач инверсии геофизических данных – обратных задач, состоит в доопределении геодинамических параметров, контролирующих ЭВОЛЮЦИЮ системы условием пошагового уменьшения невязки между измеренным и моделируемым от эволюционирующей системы гравитационным полем. Результатом эволюции такой системы от некоторого начального положения оказывается модель среды, удовлетворяющая заданному гравитационному полю. Выведенные уравнения эволюции для перераспределения масс и движения контактных поверхностей распадаются на элементарные движения сдвиговой (трансформной), дилатационной деформации и эволюции дивергентного типа, сопровождающейся привнесением или оттоком материала. Эволюция всей системы в целом представляет собой суперпозицию этих элементарных процессов, для каждого из которых выведены правила формирования управляющих процессом параметров, выраженных через невязку гравитационных полей. Разработанные принципы и выведенные уравнения позволяют включать в процесс решения обратной задачи априорной информацию о сценариях эволюции системы, её возможном генезисе.

Для построения на этой теоретической основе математического обеспечения и создания действующей технологии инверсии с использованием принципов эволюционно-динамического моделирования необходим предметный анализ типовых структурно-тектонических элементов, данные которого далее следует использовать в параметризованном виде (с параметрами масштаба) для формирования управляющих параметров итерационных процессов, составляющих основу вычислительного процесса.

Программная реализация технологии эволюционно-динамического моделирования на основе созданных теоретических положений выполнена в программном комплексе, получившем название GeoVIP. Для его полноценного необходимо создание «модификаторов» функционирования структурнотектонических элементов, обеспечивающих введение в качестве параметров итерационных процессов конкретизированных для моделируемых условий структурно-тектонических элементов из общего, характерного для региона классификатора структурно-тектонических элементов. «Модификатор» обеспечивает воспроизводство теоретически или экспериментально установленного закона смещения точек границы структурной модели, соответствующий выбранному физическому процессу образования геологических структур из заланного класса.

С целью классификации и описания тектонических процессов, были изучены основные виды механические движений земной коры под воздействием внутренней энергии Земли [9, 10]. Результатом стала схема основных тектонических движений и структур, которые образуются в результате данных видов движения (рис. 2.15). Следует отметить, что количество различных типов движения, образующих основные геологические структуры, невелико. Более сложные структуры образуются в результате различных комбинаций основных видов движения: вековых колебаний земной коры, складкообразующих движений (сжатий, растяжений и сдвигов) и движений по разрывам. Можно сделать вывод о том, что моделировать сложные геологические структуры также следует с помощью сложения простых компонент-модификаторов.



Рисунок 2.15 – Схема тектонических движений и образуемых геологических объектов

Создание банка эволюционно-динамических моделей и основные принципы формирования геодинамических модификаторов

Для формирования принципов создания геодинамических модификаторов дополнительно были изучены доступные данные по геологическим объектам Баренцево-Карского региона (складчато-надвиговые образования Новой Земли и Пахойского поднятия, складчатые образования Северного Урала, Предуральский прогиб, Уральское горноскладчатое сооружение, структурные образования Южно-Карской впадины), Тимано-Печорского региона (Припечорская система разломов, Тиманские зоны разломов, главный Уральский разлом) и сложная чешуйчато-надвиговая структура Палеоурала.

По результатам работы с фактическим материалом создан банк тектонических физико-геологических моделей с распределёнными параметрами, как характеристика структурно-тектонических элементов, входящих в конструкцию физико-геологической модели с описанием составляющих элементов и законов их трансформации.

Банк содержит программно-алгоритмическую основу, обеспечивающую хранение, доступ и оперирование входящих в него элементов для обработки в модулях программного обеспечения системной инверсии и собственно наполнение – конкретную систему данных тектоно-физических элементов, сформированную на основе проведённой классификации геолого-геофизического материала. Классификация основана на тектоническом районировании Тимано-

Печорской нефтегазоносной провинции. Сейчас она включает в себя данные по крупным тектоническим элементам, осложняющим их разломам и структурам. В дальнейшем банк будет детализироваться (переход к тектоническим элементам меньших порядков). Создаваемый банк служит основой для базы модификаторов типовых тектонических элементов разрабатываемого программного обеспечения и характерных для строения моделируемого региона. Модификаторы используется как критерий оптимальности при построении сбалансированных геолого-геофизических моделей сложнопостроенных сред.

В сформированном банке эволюционно-динамических данных выделены и математически описаны основные формы деформации структурных границ, после чего они были программно реализованы в редакторе геологогеофизических моделей GeoVIP в виде инструментов для модификации границ структурной модели (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Геодинамические модификаторы структурных границ

При моделировании сложнопостроенных сред, характеризующихся распределёнными параметрами, мы неизбежно сталкиваемся с рядом проблем, порождённых эффектами эквивалентности и формами её проявления – практической и скрытой эквивалентностями. 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 [11]. Теоретическую основу составило исследование и использование свойств экстремальных классов как многообразия решений уравнений Эйлера для соответствующей вариационной задачи.

3. Апробация разработанного программного обеспечения

В данной главе описаны возможности применения разработанного программного обеспечения на тестовых примерах, представлены результаты его использования для моделирования осадочного чехла Воргамуссюрской среды гряды Чернышева, а также для построения глубинных структурно-плотностных моделей Печоро-Баренцевоморского региона. По итогам работ подготовлены рекомендации к использованию программного обеспечения.

3.1 Решение прямой задачи гравиразведки в Playground

В данном разделе будут представлены возможности Playground, т. е. результаты применения программного продукта на простых моделях, характерных для ТПП.

На рисунках 3.1–3.7 представлено формирование начальной структурноплотностной модели Воргамусюрской структуры гряды Чернышева для одного из профилей в программном модуле Playground и расчёт гравитационного эффекта (решение прямой структурной задачи гравиразведки). Это из наиболее интересных объектов со сложным геологическим строением. Поисковый интерес здесь представляют разуплотнения в отложениях салюкинской свиты верхнего ордовика [14].

Исследуемая территория расположена в пределах гряды Чернышева, которая характеризуется сложным тектоническим строением. По материалам геолого-геофизических данных её строение представляется в виде сложной веерообразной структуры во фронте Косью-Роговской надвиговой пластины, сформированной в результате послойного срыва по верхнеордовикским соленосным отложениям. У поверхности этот срыв выражен дугообразным в плане Западным и встречно падающим Восточным надвигами. Внутренняя приповерхностная структура гряды Чернышева, представлена двумя веерообразно расположенными асимметричными чешуями – моноклиналями, которые разделены осевыми синклиналями. Строение и сдвоение толщ разного стратиграфического уровня вскрыто в отдельных скважинах на Усино-Кушшорской, Хоседаю-Неруюской, Адакской и Адзъвинской площадях, а также в пределах Воргамусюрской структуры (рис. 3.1).

Для решения поставленных задач были построены начальные геоплотностные модели среды вдоль линий, совмещённых с сейсморазведочными профилями 20992–07, 20993–04, 20993–12б, 20992–12 и сформированных на основе данных сейсморазведочных, гравиразведочных работ, геологических съёмок и данных бурения скважины 1–Воргамусюр. Расположение линий расчётных

59

профилей предполагает изучение дислокаций осадочного чехла в районе Воргамусюрской структуры Тальбейского блока гряды Чернышева вкрест изолиний гравитационного поля и изучаемого объекта и по простиранию. Расчётные профили находятся не только в пределах гряды Чернышева, но и распространяются на прилегающую часть западного борта Косью-Роговской впадин. Это вызвано необходимостью учёта влияния на гравитационное поле боковых зон и сложным тектоническим строением исследуемой территории.



Рисунок 3.1 – Выкопировка из тектонической схемы: НЕФТЕГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ: 6-10 – Хоседаюский НГР; ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ: К 2 – Гряда Чернышева; К 2-1 – Хоседаюский вал; К 2-2 – Тальбейский блок; К 2-5 – Адзьвавомская депрессия

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ

ГРАНИЦЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

	ВЫЯВЛЕННЫЕ		ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ГРАНИЦА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В ЗАПАЛИО
\bigcirc	ПОДГОТОВЛЕННЫЕ	·	КОМПЛЕКСОВ В ЗАПАДНО- УРАЛЬСКОЙ МЕГАЗОНЕ НАДПОРЯДКОВЫХ
	В БУРЕНИИ		I порядка II порядка ГРАНИЦА РЕСПУБЛИКИ
\bigcirc	ВЫВЕДЕНЫ ИЗ БУРЕНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ РЕЗУЛЬТАТОМ		КОМИ НЕФТЕПРОВОД ПОДЗЕМНЫЙ ГАЗОПРОВОД ПОДЗЕМНЫЙ

Перейдём к описанию применения Playground для построения физикогеологической модели по профилю 20992–07. Для остальных разрезов порядок действий такой же.

1. Импортируем в модуль Playground изображение геологического разреза, наблюдённое гравитационное поле (формат *.exl), проводим оцифровку границ, наполнение модели плотностными характеристиками (рис. 3.2, 3.3).

2. Производим расчёт прямой задачи гравиразведки для определения качества нулевого приближения. Для данного профиля начальная невязка составляет 18 миллигал (рис. 3.4). Невязка в данном случае есть среднее значение модулей разностей наблюдённого и рассчитанного полей.

3. Корректируем границы, получаем невязку 16 миллигал (рис. 3.5).

4. Уменьшаем невязку подбором плотностных неоднородностей, аппроксимируемых телами простой формы (эллипс, прямоугольник, уступ), невязка 12 миллигал (рис. 3.6).

5. Формируем нулевое приближение – физико-геологическую модель по профилю (рис. 3.7).

Условные обозначения к рисункам 3.2-3.7							
	– плотности, г/см ³		– наблюдённое Δg ;				
	(на рисунках дана шкала)						
		~ ~	– рассчитанное Δg от структурной				
			модели;				
			– рассчитанное от включённых				
		· · ·	плотностных тел;				
			– невязка (среднее значение модулей				
			разностей рассчитанного и наблю-				
			дённого Δg)				

На рисунках в верхней части показано гравитационное поле (наблюдённое, структурная задача, плотностная задача, невязка рассчитанного и наблюдённого полей). В нижней части изображаются структурно-плотностные модели рассматриваемых профилей.

На рисунке 3.6 выделены тела красного цвета: круг, прямоугольник отражают изменение плотности внутри выделенной области на указанную в середине величину.



Рисунок. 3.2 – Геолого-геофизическая модель по профилю 20992-07



Рисунок 3.3 – Формирование структурно-плотностной модели по профилю 20992–07



Рисунок 3.4 – Решение прямой задачи гравиразведки по профилю 20992–07. Невязка 18 мГал



Рисунок 3.5 – Корректировка границ в начальной модели по профилю 20992–07. Невязка 16 мГал



Рисунок 3.6 – Корректировка плотностных характеристик по профилю 20992–07. Невязка 12 мГал

Далее рассмотрим работу программы для типичных структурных элементов ТПП.

На рисунке 3.8 показан геолого-геофизический разрез Ухтинской складки Тиманского кряжа. Отложения представлены породами верхнего отдела девонской системы. В отложениях франского яруса выявлены рифогенные постройки.

На рисунке 3.9 демонстрируется эффект от рифогенной постройки (до 0,20 мГал), на рисунке 3.10 – суммарный эффект от всего разреза. Доминирующее влияние на поле силы тяжести здесь оказывает плотностная граница чехолфундамент, поскольку глубина залегания фундамента составляет 500 м.

Геолого-плотностной разрез территории Вычегодского прогиба и Западно-Тиманской структурно-тектонической зоны представлен на рисунке 3.11. Верхнесысская структура сформирована в надсолевых отложениях рифейского возраста. Соляной купол отображается в гравитационном поле минимумом.

Формирование модели на территории Вычегодского прогиба и Западно-Тиманской структурно-тектонической зоны – на рисунках 3.12, 3.13. На рисунке 3.12 показано отображение в гравитационном поле солёного купола, на рисунке 3.13 – суммарный эффект.



Рисунок 3.7 – Физико-геологическая модель. Нулевое приближение по профилю 20992–07. Невязка 12 мГал



Рисунок 3.8 – Геолого-геофизический разрез Ухтинской складки Тиманской гряды в Playground



Рисунок 3.9 – Формирование структурно-плотностной модели Ухтинской складки Тиманской гряды в Playground. Гравитационный эффект от рифогенной постройки



Рисунок 3.10 – Формирование структурно-плотностной модели Ухтинской складки Тиманской гряды в Playground. Суммарный гравитационный эффект



Рисунок 3.11 – Геолого-плотностной разрез территории Вычегодского прогиба и Западно-Тиманской структурно-тектонической зоны

🥮 Конструкте	ор структурно	й модели -								×
Файл Прави	ка Параметры	Вид Экспор	от ?							
Pax		Аппроксимаци	онная	Структурна	R	Наблюдённое	Cy	ммарное	Невяз	ka
U							Среднее	Среднее квадратичное невязки		
							Cp	едний модуль не	вязки 5,8303	607
0	1000	2000	3000	4000 Mogens	5000	6000 Подложка	7000	8000	3000	
0000	1000	2000	3000	4000	5000	16000	7000	8000	2.58 2.74 2	3
1										
2000			-0,5			-				
3000						-				
4000	351		-							

Рисунок 3.12 – Формирование модели по территории Вычегодского прогиба и Западно-Тиманской структурно-тектонической зоны в Playground. Гравитационный эффект от рифогенной постройки



Рисунок 3.13 – Формирование модели по территории Вычегодского прогиба и Западно-Тиманской структурно-тектонической зоны в Playground. Суммарный гравитационный эффект

Таким образом, наличие данного программного продукта позволяет быстро и качественно создавать пилотные структурно-плотностные модели, с последующим использованием для решения различных задач. В следующем разделе речь пойдёт о методе решения обратных задач гравиразведки.

3.2 Решение обратной задачи гравиразведки в EvDynInversion

Алгоритм, заложенный в программном модуле EvDynInversion, представляет собой итерационную схему решения обратной задачи с применением уравнений движения материи в качестве составляющей критерия оптимальности [12, 15]. На первом этапе выполняется компенсация невязки за счёт сдвиговых деформаций. На втором этапе невязка компенсируется за счёт дивергенции. Модели, полученные в результате работы модуля, удовлетворяют наблюденным потенциальным полям и соответствуют заложенным в процесс решения геодинамическим характеристикам.

Перед тем как перейти к модельным примерам, опишем как происходит работа в данной программе [16]. Загрузка текущей модели может происходить как из файлов .m2d (основной формат программы), так и из файлов формата .dat, т. е. есть возможность модель, полученную в Playground, использовать для работы в EvDynInversion. В правой части сетки сверху отображаются загруженные значения глубин границ, а в нижней – загруженные значения параметра плотности (рис. 3.14).

🔜 Эволюционно-динамическая инверсия для гравиразведки									
Модель Поля Инверсия									
Загрузить глубины границ		0	1	2	3	4	^		
	► C	0	0	0	0	0			
Загрузить плотности	1	800	400	0	0	0			
Сформировать модель	2	2250	2187.5	2058.333333333	1829.166666666	1600	Ξ		
	3	3000	2812.5	2625	2437.5	2250			
	4	3900	3745.930232558	3591.860465116	3437.790697674	3283.720930	-		
	5	5000	4850	4700	4538.815789473	4377.631578			
	E	6000	5962.5	5925	5887.5	5850			
	7	6000	5962.5	5925	5887.5	5850	~		
		0	1	2	3	4	^		
	► C	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35			
Сохранить поле	1	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	≡		
	2	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7			
	3	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73			
	4	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74			
Загризить наблюденное поде	E	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4			
	E	2.58	2.58	2.58	2.58	2.58	~		
Расчет обратной задачи	<					>			
		Началы	ный 🗙 0	\$	Верхняя граница:	10		\$	
Шаг по Х: 500 🗘 Нижняя граница: 10000						10000	_	\$	
	Плотност	гь над верхней гран	ицей: 0.00	ᅌ Плотность по	д нижней границей:	2.86		\$	

Рисунок 3.14. Ввод исходных данных по профилю в EvDynInversion

При формировании модели количество точек параметров и границ должно совпадать, а строк параметров меньше, чем границ, на одну. В этом случае модель будет сформирована и станет доступна кнопка «Посмотреть модель», если все соответствует данным, вы можете сохранить построенную модель в формате m2d.

Окно просмотра текущей модели (рис. 3.15) разделено на две части: внизу расположена структурно-параметризованная модель, вверху – гравитационный эффект модели. Здесь можно не только посмотреть загруженную модель, но и подготовить её к итерационному расчёту (решению обратной задачи).



Рисунок 3.15 – Окно просмотра модели по профилю

При работе в программе имеется возможность переименования границ, визуализации задаваемых плотностей, расчёт поля в системе СИ или СГС, редуцирование рассчитываемого поля на некоторую величину. Перед решением обратной задачи задаётся максимально допустимая невязка наблюдённого и рассчитанного полей, операторы сдвига и дивергенции. Результат решения обратной задачи в окне программы приведён на рисунках 3.16 (а, б).









Рисунок 3.16 (б) – Результат решения обратной задачи по профилю в окне программы. Невязка 1,8 мГал.

Продолжим работу над профилем Воргамусюрской структуры гряды Чернышева 20992–07 (рис. 3.7). После преобразования моделей профилей Воргамуссюрской структуры в формат EvDynInversion были произведены следующие шаги:

1) Решение обратной задачи за счёт сдвиговых деформаций границ (рис. 3.17): выбираем максимальное количество итераций, устанавливаем минимальное допустимое значение невязки. В нашем случае это 2–3 миллигала, и задаём коэффициенты оператора сдвига. При расчёте можно контролировать процесс решения задачи по виду зависимости невязки от числа шагов. Для данного профиля решение обратной задачи такого типа не даёт уменьшения невязки рассчитанного и наблюдённого полей. В этом случае рекомендуется перейти к решению плотностной задачи за счёт выполнения дивергентных движений (переноса массы).

2) Второй этап инверсии: выбираем максимальное количество итераций, минимальную допустимую невязку и задаём оператор с параметрами критерия оптимальности для решения обратной плотностной задачи за счёт выполнения дивергентных движений. Результат решения с невязкой 1,8 миллигала показан на рисунке 3.17. Среди решений, соответствующих разным критериям оптимальности выбираем то, которое лучше согласуется с наблюдённым полем, и не противоречит имеющимся представлениям о геологическом строении изучаемой террритории.

При итерационном процессе в каждом приближении к модели-решению сохраняются основные черты тектонического строения и распределения плотностных неоднородностей. Для изучаемого разреза характерна вертикальная зональность изменения плотностей, вследствие сдвоения стратиграфических подразделений различного возраста и литологии, и латеральная изменчивость, вследствие расположения профилей в различных тектонических зонах. Достигнутая невязка позволяет предположить, что предлагаемая физикогеологическая модель удовлетворяет наблюдённому полю и не противоречит априорной информации.

На представленной модели (рис. 3.17) выделены слои, характеризующиеся типичными для исследуемого участка величинами плотностей. Максимальное значение гравитационного поля в пределах пикетов 7500–10000 миллигал отображает сдвоение карбонатных толщ палеозойской системы и выход пород с плотностью 2,70–2,74 г/см³ на дневную поверхность. Как видно по разрезу, региональная составляющая гравитационного поля отображает влияние отложений фундамента с плотностью 2,90–2,95 г/см³.

72




Полученные невязки свидетельствуют о хорошей сходимости наблюдённого и рассчитанного гравитационных полей и сбалансированности гравитирующих масс.

При проведении апробации программы были выявлены некоторые особенности алгоритма, которые необходимо учитывать.

Результаты показывают, что при расчёте оператора сдвига:

- свёртка с единичным импульсом позволяет получить более сглаженные структуры;

- умножение на малые коэффициенты позволяет замедлить сдвижение границы в определённой точке;

- умножение на нули позволяет «удерживать» границу от сдвижения.

При расчёте оператора дивергенции:

- свёртка с единичным импульсом позволяет получить более ровное распределение параметра;

- умножение на малые коэффициенты позволяет замедлить наращивание параметра в определённой точке.

Двухэтапная схема инверсии, построенная на эволюционнодинамических принципах, позволяет получить решение обратной задачи гравиметрии при наличии некоторых априорных сведений о среде, учитывающихся матрицей операторов сдвига и дивергенции, а также в порядке применения трансформаций.

Испытания алгоритма системной инверсии на основе эволюционнодинамических принципов показывают, что двухэтапная итерационная схема позволяет получать содержательные двухмерные структурно-параметризованные и сеточные модели среды. Созданный программный модуль также позволяет создавать произвольные расчётные схемы и наращивать количество видов трансформаций модели.

Поскольку метод решения прямой задачи является одним из входных параметров расчёта, алгоритм является достаточно универсальным, чтобы использовать его для инверсии различных содержательных задач геофизики.

3.3 Построение 3D-моделей на основе согласованной интерполяции данных профилей в редакторе GeoVIP

Одним из назначений редактора GeoVIP является интеграция интерполяционного моделирования на основе геометрических принципов и принципов геофизической инверсии с методами формирования тектонических структур, моделирующих результаты изучения экспериментальных данных тектонических процессов.

Покажем работу редактора GeoVIP на шаге реконструкции модели Воргамусюрской среды при построении трёхмерной физико-геологической модели на основе опорных двумерных данных профилей (полученных на основе решения обратных задач в EvDynInversion) с балансировкой по гравитационному полю стало. Этап включает следующие шаги:

1) ввод площадных данных смоделированных профилей в программный редактор GeoVIP и импортирование файловых данных структурнопараметризованных моделей (рис. 3.18);

2) согласование геометрии построенных структурных карт (рис. 3.19) с данными профилей при помощи алгоритма поиска несоответствий геометрии границ. Все ситуации несоответствия геометрии 2D-профилей и 3D-сеток разрешались экспертом-интерпретатором;

 интерполяцию трёхмерного распределения параметра плотности на основе весового алгоритма с последующей балансировкой модели по гравитационному полю;

4) трёхмерную визуализацию полученной объёмной модели (рис. 3.20).



Рисунок 3.18. Реконструкция профилей 20992–07 Воргамуссюрской структуры в программном редакторе GeoVIP



Рисунок 3.19 – Структурные карты в GeoVIP для Воргамусюрской структуры



Рисунок 3.20 – Трёхмерная структурно-плотностная модель Воргамусюрской структуры

Следующим объектом, представленным в работе, является Геофизическое месторождение, расположенное в пределах Центральной части Обской губы и приуроченное к одноименной структуре. Оно характеризуется достаточно слабой изученностью геолого-геофизических данных. На основе имеющихся материалов [17] была сформирована обобщённая априорная модель. Реконструкция и уточнение геоплотностной модели Геофизического месторождения заключалось в проведении интерпретационных процедур по следующей методологической схеме: на первом этапе, в профильном варианте, интерпретация проводилась на основе решения 2D обратной структурной задачи гравиразведки и обратной задачи гравиразведки в классе распределения плотностей. В капрограммной EvDynInversion. честве реализации была использована Следующий этап заключался в формировании объёмной геоплотностной модели в разрабатываемом комплексном редакторе геолого-геофизических моделей GeoVIP на основе реконструированных на первом этапе двухмерных моделей. Этот этап включил в себя:

ввод в базу данных системы структуры объектов исследований (профилей, структурных карт и пластов с соответствующими пространственными параметрами рисунках 3.21–3.23);

🗄 Площадь 🛛 🔀
Наименование
Геофизическое
Описание
Геофизическое месторождение
ОК Отмена

Рисунок 3.21 – Создание площади

🖳 Исследование	$\overline{\mathbf{X}}$
Объект исследований Профиль 1	Тип исследований Структурно-плотностная модель 💌
Название	
Описание	
	ОК Отмена

Рисунок 3.22 – Добавление структурно-плотностной модели для первого профиля



Рисунок 3.23 – Структура исследований по профилям

- загрузку информации о модели для профилей (геометрия, плотностные характеристики, рис. 3.24–3.25), итоговые начальные модели и схема профилей представлены на рисунках 3.26–3.27;



Открыть		? 🗙
<u>П</u> апка:	🖸 NP 1 💽 🕑 😥 🛄 🗸	
Недавние документы	 Геометрия плотностной модели.txt Гравитационное поле.txt Параметры плотностной модели.txt 	
Рабочий стол		
🍎 Мои документы		
П ой Компьютер		
	Имя файла: Геометрия плотностной модели.txt 💌 🛄тки	рыть
Сетевое	<u>Т</u> ип файлов: Текстовые файлы 🔽 От	иена

Рисунок 3.24 – Загрузка геометрии структурно-плотностной модели

- загрузку наблюдённого и получение рассчитанного 2D гравитационных полей по всем профилям и при необходимости коррекцию моделей (рис. 3.28–3.30);



Рисунок 3.25 – Геометрия структурно-плотностной модели



Рисунок 3.26 – Схема профилей Геофизического месторождения



Рисунок 3.27 – Нулевые приближения профилей геофизического месторождения





Рисунок 3.28 – Изменение границы структурно-плотностной модели. Добавление новой точки



Рисунок 3.29 – Изменение плотностного параметра структурно-плотностной модели

🖳 Профиль				X
Общие				
Название:				_
Профиль Г				
Описание:				_
-				
І очки профиля			Q	
			A ROHUA.	
407000,00			481401,00	¥
Y начала:	Гначала:		Y конца:	
7736531,50			7748977,00	-
Точки изгиба пр	офиля:			
x=445547;y=774	3179			
	X: 0,00		🐑 Y: 0,00	-
Пикеты				
Шаг:			Номер первого пикета:	
5000		-	1	-
		Создать	пикеты	
			ОК Отмен	

Рисунок 3.30 – Изменение параметров профиля

- интерполяцию структурной геометрии для формирования трёхмерной структурной модели на основе геометрии профилей участка;

- загрузку в базу данных структурных карт пластов Центрально-Обского участка (рис. 3.31);

Месторождение	Вид объекта
Геофизическое 🗸 🗸	Структурная карта 🗸 🗸
Название	
Рельеф	
Описание	
Кровля пласта 🕇	
	ОК Отмена

Рисунок 3.31 – Добавление объекта «структурная карта»

- ввод плотностных параметров для трёхмерной модели геофизического месторождения (детализация 2D-модели);

- аппроксимация трёхмерной сетки распределения параметра для объёмной модели;

- создание трёхмерной структурно-плотностной модели месторождения (рис. 3.32).



Рисунок 3.32 – Трёхмерная визуализация структурно-плотностной модели геофизического месторождения

Работа в данной программе проводится одинаково, как для построения моделей осадочного чехла (локальный уровень), так и для глубинных моделей (региональный уровень). Покажем результаты работы в редакторе GeoVIP для реконструкции глубинной модели Баренцевоморского региона. На рисунке 3.33

представлено окно редактора со схемой профилей: Структурно-плотностная модель одного из профилей изображена на рисунке 3.34. И, наконец, объёмная модель показана на рисунке 3.35.



Рисунок 3.33 – Реконструкция профилей по Баренцевоморскому региону в программном редакторе GeoVIP

Новая точка	₩1 	<u>]</u> ≉ ₹ 1	÷ \$ (🔊 🔇 Разло	омы -	2	2.20 2.40 2.6	60 2.80
Новая граница		100000	200000	300000	400000	500000	600000	70000
Блоки ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЈ ▲ ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЈ ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЈ ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЈ ОСАДОЧНЫЙ ЧЕХОЈ Ф (0) Ф (257000) Ф (486800) Ф (562300) ▼	10000 20000 30000							×
Изменить блок Рассчитать поле плотн Рассчитать поле	50000 60000 70000							
	4							

Рисунок 3.34 – Реконструкция профиля 9 по Баренцевоморскому региону в программном редакторе GeoVIP



Рисунок 3.35 – Объёмная геоплотностная модель Баренцевоморского региона в программном редакторе GeoVIP

По итогам аппробационного моделирования при помощи разработанной интегрированной среды создания и поддержки физико-геологических моделей на основе геофизической инверсии можно сделать следующие выводы:

1) Программный модуль PlayGround позволяет оперативно произвести формирование структурно-плотностной двухмерной модели геологической среды.

2) PlayGround позволяет быстро выполнить коррекцию глубин залегания выделенных границ и плотностных характеристик двухмерной модели.

3) Программный модуль EvDynInversion позволяет решать обратные задачи гравиразведки за счета выполнения дивергентных движений масс и сдвиговых деформаций границ на основе объединённого критериального и эволюционно-динамического принципа, что позволяет более полно учитывать имеющиеся априорные данные об объекте исследования.

4) Программный редактор GeoVIP может использоваться для создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды, как двухмерных, так и трёхмерных, расчёта гравитационного эффекта для данных моделей и их инверсии на основе критериального подхода.

5) Разработанные программные модули достаточно универсальны и могут быть использованы для решения различных геологических задач в рамках процессов анализа структурно-параметризованных и сеточных физикогеологических моделей.

6) Преимуществом применения разработанного программного обеспечения является соответствие сформированных моделей наблюдённым гравитационным полям, а также заданным эволюционно-динамическим критериям формирования среды, что обеспечивает состоятельность и содержательность полученного результата.

7) Совместное использование двумерного и трёхмерного моделирования будет способствовать более содержательной трактовке геологических моделей исследуемого региона.

85

Заключение

В данной монографии рассматривались вопросы применения методов системного анализа при проектировании и разработке технологии построения физико-геологических моделей. Были кратко описаны основные современные методики и средства физико-геологического моделирования, рассмотрена общая информационная модель геофизических исследований. Описаны принципы системного анализа физико-геологических данных, введённые 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 поставлены требования К современной принципов системе физикогеологического моделирования. Впервые была выполнена постановка и исследование задачи проектирования и разработки интегрированной технологии анализа геофизических данных и физико-геологического моделирования на основе инверсии при помощи методов системного анализа. Была рассмотрена информационная модель процессов создания, анализа и поддержки физикогеологических моделей на основе геофизической инверсии, а также концепция интегрированной среды физико-геологического моделирования на основе системной инверсии.

Изложена концепция порядка формирования интегрированной физикогеологической модели на основе разработанных программных средств и технологий. Создано единое хранилище физико-геологических данных, алгоритмы конвертирования и передачи данных для использования в смежных системах анализа физико-геологических данных. Разработан программный редактор физикогеологических моделей GeoVIP, позволяющий создавать и поддерживать согласованные трёхмерные модели месторождений на основе решений прямых и обратных задач гравиметрии и электрометрии. В работе описано созданное математическое И программное обеспечение технологии эволюционномоделирования, линамического включающее инверсию структурнопараметризованных моделей на основе эволюционно-динамических принципов.

Были разработаны основные модули интегрированной среды физикогеологического моделирования на основе системной инверсии: создано единое хранилище физико-геологических данных; программное обеспечение, выполняющее инверсию двумерных структурно-параметризованных моделей на основе ЭДП (получено авторское свидетельство); создано программное обеспечение трёхмерного согласованного физико-геологического моделирования – редактор GeoVIP (получено авторское свидетельство). Созданное программное обеспечение было апробировано в ходе построения ряда структурно-плотностных согласованных моделей профилей Воргамуссюрской среды гряды Чернышева. Также при помощи редактора GeoVIP построены модели профилей Центральной части Обской губы, объёмные структурно-плотностные модели Геофизического месторождения, Баренцевоморского месторождения и Воргамуссюрской среды.

Концепция интегрированной среды физико-геологического моделирования, несомненно, требует дальнейшего развития – как в аспекте развития теории и методов системной инверсии, так и в плане проектирования и создания новых модулей ПО, разработки методических рекомендаций по их использованию.

Список литературы

1. Мотрюк, Е. Н. Современные отечественные программные комплексы интерпретации гравимагнитных данных / Е. Н. Мотрюк, О. М. Вельтистова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Вып. № 3 (15). – 2013. – С. 70–80.

2. Кобрунов, А. И. Математические методы моделирования в прикладной геофизике. Избранные главы. Ч. 2. Системный анализ и моделирование в условиях неопределённости : учеб. пособие / А. И. Кобрунов. – Ухта : УГТУ, 2014. – 154 с.

3. ООО «Газфлот» – 10 лет на арктическом шельфе : сб. статей / под общ. ред. А. Я. Манделя, Е. В. Захарова, В. А. Холодилова. – М. : ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 232 с.

4. Кобрунов, А. И. Программный комплекс создания и поддержки геолого-геофизических моделей среды GeoVIP и его функциональные возможности / А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин, М. И. Барабанов // II Научно-практическая молодёжная конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (6–7 октября 2010 г.) : материалы конференции: – М., 2010. – С. 18.

5. Кобрунов, А. И. Некоторые особенности методов подбора в геофизических задачах / А. И. Кобрунов // Докл. АН УССР, Б. N4. – 1984. – С. 10–13.

6. Кобрунов, А. И. О постановке и принципах решения обратных задач магнитотеллурического зондирования для сред с распределёнными параметрами / А. И. Кобрунов, Г. С. Жаркой // Геофизика. – 2010. – № 4. – С. 9–16.

7. Кобрунов, А. И. Геодинамические принципы постановки обратных задач гравиметрии / А. И. Кобрунов // Геофизика, № 3. – 2005. Евро-Азиатское геофизическое общество. – 2005. – С. 33–45.

8. Кобрунов, А. И. Эволюционно-динамические принципы при реконструкции плотностных моделей седиментационных бассейнов / А. И. Кобрунов // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26, № 4. – С. 45–54.

9. Малышев, Н. А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского севера России / Н. А. Малышев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 310 с.

10. Хаин, Н. Д. Геология, разведка, бурение и добыча нефти / Н. Д. Хаин. – М. : Олимп-бизнес, 2008. – 726 с.

11. Кулешов, В. Е. Интегрированные технологии, обеспечивающие эволюционно-динамический анализ геолого-геофизических данных / В. Е. Кулешов, А. И. Кобрунов, С. С. Антонов // 34-я сессия Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (29 февраля – 3 февраля 2007 г.; Москва) : материалы семинара. – М. : Изд-во ИФЗ РАН, 2007. – С. 137–140.

12. Кобрунов, А. И. Итерационная схема инверсии геофизических полей с применением эволюционно-динамических принципов / А. И. Кобрунов, С. Г. Куделин // 39-я 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.

13. Технология создания физико-геологических моделей сред на основе построения оптимальных решений обратных задач / М. И. Барабанов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. – Казань. – № 3. – С. 54–62.

14. Мотрюк, Е. Н. Апробация новых программных модулей на примере моделирования строения Воргамусюрской структуры гряды Чернышева / Е. Н. Мотрюк, О. М. Вельтистова // Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского (Воронеж, 30 января – 2 февраля 2012 года). – С. 189–192.

15. Куделин, С. Г. Алгоритмическое и программное обеспечение технологии создания физико-геологических моделей сред на основе построения оптимальных решений обратных задач / С. Г. Куделин, М. И. Барабанов, А. И. Кобрунов // Материалы 38-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». – Пермь : ГИ УрО РАН, 2011. – С. 154–157.

16. Куделин, С. Г. Технология интегрированного физико-геологического моделирования на основе системной инверсии / С. Г. Куделин, М. И. Барабанов, А. И. Кобрунов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2012. – № 4/269. – С. 22–28.

17. Отчёт «Построение объёмной геолого-геофизической модели в пределах Центрально-Обского участка (Геофизическое месторождение) на основе геоплотностного моделирования с целью изучения его глубинного строения», Ухта, 2007.

89

Научное издание

Кобрунов Александр Иванович Куделин Сергей Георгиевич Мотрюк Екатерина Николаевна

Интегрированная среда физико-геологического моделирования на основе системной инверсии

Монография

Редактор П. В. Котова Технический редактор Л. П. Коровкина

План 2015 г., позиция 10(н). Подписано в печать 30.09.2015 г. Компьютерный набор. Гарнитура Times New Roman. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,2. Уч.-изд. л. 4,7. Тираж 100 экз. Заказ №299.

Ухтинский государственный технический университет 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13. Типография УГТУ. 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, д. 13.