

*На правах рукописи*

**Бисеркин Игорь Алексеевич**

**Технология интерпретации данных потенциальных полей  
при изучении строения земной коры  
(на примере Байкитской антеклизы)**

Специальность 25.00.10 - Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2013 г.

Работа выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент кафедры геофизики МГРИ-РГГРУ  
Лобанов Александр Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Тихоцкий Сергей Андреевич  
(Институт физики земли РАН)

кандидат технических наук  
Пигузов Сергей Юрьевич  
(РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина)

Ведущая организация: ГНПП «Аэрогеофизика»

Защита диссертации состоится 12 декабря 2013 г. В 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » ноября 2013 г.

Учёный секретарь  
диссертационного  
совета, доктор физико-  
математических наук

А. Д. Каринский

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность.** Проблема изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии является одной из стратегических направлений геофизических исследований, обеспечивающих развитие наук о Земле. При этом гравиразведка является одним из основных методов изучения строения земной коры.

В последнее время бурно развиваются направления, связанные с 3D изучением земной коры разными геофизическими методами. Поэтому получение пространственного распределения плотности в земной коре представляет важный аспект комплексной интерпретации геофизических данных. Так при изучении территории по сети сейсмических профилей строятся карты глубины залегания горизонтов осадочной толщи, фундамента и более глубинных границ. Имея геометрию разреза, можно проводить изучение плотностных неоднородностей слоистой среды в 3D пространстве, используя гравитационное поле на изучаемой территории.

В настоящее время уже во многие существующие технологии обработки данных гравиразведки включены как методы решения обратной задачи, позволяющие получать распределение отдельных 3D плотностных объектов или трехмерное распределение плотности в земной коре, так и методы решения прямой задачи для 3D среды. При 3D моделировании среды, когда модель формируется в виде совокупности тел: пластин, уступов, призм и т.д., процесс задания и изменения модели трудоемок, может содержать большое количество ошибок в задании геометрии тел, и часто довольно грубо описывает эту среду. Для 3D сеточных моделей (физические свойства приписаны не телу, а точке в пространстве) сложности связаны с изменением параметров модели. Таким образом, возможность широкого применения методов моделирования при решении геологических задач лежит в области обеспечения их технологиями, позволяющими проводить построение, визуализацию, редакцию 3D моделей.

Поэтому решение методических и технологических проблем построения 3D сеточных плотностных моделей на основе данных о залегании границ слоистой среды по данным глубинной сейсморазведки является весьма актуальным.

**Цель исследований.** Создание методики и технологии интерпретации данных потенциальных полей при изучении строения земной коры.

### **Задачи исследований.**

1. Анализ современного состояния методик и компьютерных технологий 3D моделирования среды.
2. Создание технологии интерактивного подбора плотностных 3D моделей для блоково-слоистой геосреды на основе использования ГИС ИНТЕГРО.
3. Разработка детализации плотностной модели земной коры на основе многопризнаковой фильтрации.
4. Апробация созданной технологии на территории Восточной Сибири.

### **Практическая значимость.**

Практическое значение исследований определяется возможностью построения сеточной 3D плотностной модели земной коры начального приближения как результата интегрированного представления разнотипных (структурных поверхностей, данных ГСЗ, точечных- скважинных данных, гравимагнитная томография) данных с реализацией единовременного сочетания векторного и сеточного их представления.

Сочетание векторного и сеточного представления геолого-геофизических объектов, является методико-технологическим решением моделирования слоисто-блоковой среды при изучении строения земной коры.

Практическое опробование метода формирования 3D сеточной модели и технологии построения плотностной модели земной коры и ее детализация реализована на примере Байкитской антеклизы, для которой построена объемная плотностная модель земной коры для прогноза вещественного состава пород.

### **Научная новизна исследований.**

1. Предложен метод формирования априорной 3D сеточной модели слоисто-блоковой среды.

2. Предложен способ изменения параметров сеточных моделей для реализации интерактивного 3D подбора.

3. Разработана технология, обеспечивающая подбор модели с использованием сеточного распределения плотности и векторно-заданных объектов.

4. Предложена технология детализации плотностной модели земной коры с использованием многопризнаковой фильтрации результатов пересчета потенциальных полей в нижнее полупространство по сети параллельных профилей.

### **Защищаемые положения.**

1. Предложенный метод формирования априорной 3D сеточной модели слоисто-блоковой среды на основе использования комплекта структурных карт контактных поверхностей и распределения плотностей в каждом слое, обеспечивает эффективное решение прямой задачи гравиразведки.

2. Технология построения (интерактивного подбора) плотностной 3D модели земной коры в среде ГИС ИНТЕГРО, включающая метод формирования 3D сеточных моделей слоисто-блоковой среды, а также путем сочетания сеточного и векторного представления геолого-геофизических данных обеспечивает оптимальное решение обратной задачи гравиразведки, адекватное реальным средам.

3. Технология детализации плотностной модели по данным гравиметрической съемки масштаба 1:200000, включающая пересчет гравитационного поля в нижнее полупространство по сети параллельных профилей, с дальнейшим вычислением вторых производных по результатам

пересчета и использования многопризнаковой фильтрации этих результатов, является технологической основой уточнения положения горизонтальных границ раздела земной коры: кристаллического фундамента, внутрикоровых поверхностей К-1, К-2, а также характера блокового строения средней и нижней частей земной коры.

### **Апробация и публикации.**

Основные положения и результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на международной научной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва 2011, 2012), 18-ой Международной конференции «Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы» (Воронеж 2012), 13-ой международной научно-практической конференции по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «Геомодель». (Геленджик 2011).

Диссертация основана на теоретических, методических и экспериментальных исследованиях, выполненных автором в 2009-2013 гг. Основные методические и технологические результаты получены непосредственно автором. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 печатные работы, из них 2 статьи в журналах - входящие в перечень ВАК и были представлены в материалах 4 международных конференциях.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержит 86 страниц машинописного текста.

### **Благодарности**

Диссертация выполнена под научным руководством к.т.н. А.М. Лобанова, которому автор выражает глубокую признательность, а также искренне благодарит д.т.н. Галуева В.И., д.ф.-м.н. Никитина А.А., д.т.н. Финкельштейна М.Я., к.т.н. Пиманову Н.Н. За консультации и неоценимую помощь при создании данной работы.

### **Содержание работы**

Краткое содержание проведенных исследований приводится по главам диссертации.

#### **Глава 1. Современное состояние технологий построения 3D плотностных моделей.**

В первом разделе главы описываются основные геологические задачи, решаемые при изучении глубинного строения земной коры, модели, приближающие среды исследований, и исходные данные.

Целью изучения строения земной коры является получение данных о глубине залегания слоев осадочной толщи и основных глубинных поверхностей,

о распределении физических свойств в земной коре, положении тектонических нарушений, проявлениях магматизма, а также прогноз вещественного состава глубинных объектов.

Таким образом, при геофизических исследованиях земной коры основными объектами исследований являются: слоистая среда, локально неоднородная слоистая среда (физические свойства меняются не только с глубиной, но и по латерали) и отдельные тела.

При глубинных исследованиях используется комплекс геофизических методов, включающий сейсморазведку, грави- и магниторазведку, электроразведку. Это обстоятельство позволяет использовать данные, полученные в рамках одного метода, для обработки данных других методов. Так, к настоящему времени территория страны покрыта сетью опорных и региональных сейсмических профилей, которые позволяют получить данные о глубине залегания горизонтов осадочной толщи, фундамента или более глубинных границ. Имея геометрию разреза можно проводить изучение плотностных неоднородностей слоистой среды в 3D пространстве, используя гравитационное поле на изучаемой территории.

Во втором разделе приводится *обзор методов решения прямых и обратных задач гравиразведки*. Вопросам решения обратной задачи гравиразведки посвящены работы А. Н. Тихонова, В.Н. Страхова, А.И. Кобрунова, Б.А. Андреева, Е.Г.Булаха, И.И. Приезжева, Ю.И. Блоха, В.Н.Глазнева, А.С. Долгая, П.И. Балка, А.Ю. Давыденко, А.В. Цирульского, В.М. Березкина и др.

Применяемые подходы, методы и средства для решения обратной задачи гравиразведки и построения 2D и 3D плотностных моделей отличаются большим разнообразием. Среди них можно выделить два основных. Первый - базируется на основе наиболее полного использования априорной информации: геологической или получаемой в результате интерпретации данных других методов. Чаще всего для геометризации среды используются данные сейсморазведки (ГСЗ). Второй подход реализуется при минимальном использовании априорной информации.

С 70-х годов прошлого века разрабатывается широкий круг методов решения обратной задачи для определения параметров отдельных трехмерных тел: контактных поверхностей, уступов и др. Как правило, эти задачи решаются методом формализованного подбора и для сложной среды требуют больших трудозатрат при задании исходных моделей.

В последние годы при построении 3D плотностных моделей строения земной коры стали широко использоваться методы, позволяющие получать трехмерное сеточное распределение в земной коре эффективной плотности. Разработано много алгоритмов, осуществляющих свертку геофизических полей с различными ядрами (зондирование, вейвлет-анализ, Фурье-анализ и т.д.). 3D сети, получаемые в результате этих преобразований, далее интерпретируются как качественное решение обратной задачи. Заметим, что Фурье анализ при некоторых предположениях дает количественное решение обратной задачи (Приезжев И.И. и др.). Рассмотрим некоторые из них.

*Технология статистического зондирования геополей в скользящих окнах.* Под статистическим зондированием полей понимается подход к оценке изменения статистических и корреляционных характеристик поля с глубиной на основе их вычисления в скользящих окнах различных размеров. При этом первый слой результирующей сети есть результат вычисления характеристик в окне, с минимальным размером, последний слой - с максимальным размером окна. Полученные с помощью статистического зондирования результаты можно использовать при построении физико-геологических моделей и оценке геометрических параметров аномалиеобразующих объектов.

*Оценка параметров аномалиеобразующих объектов на основе модификаций метода Андреева.* Метод построен на использовании алгоритма фильтрации наблюдений в окне живой формы. В основе лежит предложенная Б.А. Андреевым идея об оценке частотных составляющих поля с помощью фильтрации данных в окнах увеличивающегося размера. Проведение такой фильтрации с последовательным уменьшением значений граничных частот позволяет построить трехмерную модель относительного распределения гравитационных и магнитных масс по глубине. Модифицированный метод Б.А. Андреева позволяет получить качественное решение оценки параметров аномалиеобразующих объектов, в условиях отсутствия информации о распределении источников.

*Решение обратной задачи гравиразведки и магниторазведки по Приезжеву И.И.* проводится посредством аналитического продолжения поля в нижнее полупространство. Алгоритм реализован в спектральной области, что делает его самым высокоскоростным из известных. Предлагаемый подход основан на теории фильтрации и имеет свойства решения обратной задачи в трехмерной постановке.

В последнее время распространение получило *решение обратных задач с использованием двумерного вейвлет разложения в виде сферически-симметричных функций.*

Таким образом, для сеточных моделей решение обратной задачи проводится без использования априорной информации, что имеет преимущества в плохо изученных районах. В достаточно хорошо изученных районах, где проведены сейсмические, буровые или другие работы и имеются данные о глубинном строении, следует иметь возможность учитывать такую информацию.

*Решение прямой задачи для 3D моделей* реализовано для широкого набора тел: шаров, цилиндров, призм, многогранников, уступов, пластин и др. Для 3D сеточных моделей распределения плотности разработан алгоритм решения прямой задачи Приезжевым И.И.

Анализ современных исследований по моделированию земной коры показал, что методы решения прямой задачи используются для расчета прямого эффекта и почти не используются для целей интерактивного подбора. Это связано с тем, что, с одной стороны, решение прямой задачи для сложной 3D среды, содержащей много неоднородностей и формируемой в виде совокупности тел: пластин, уступов, призм и т.д., традиционно является очень трудоемкой

задачей, сопряженной с большим количеством ошибок, что связано с заданием и изменением параметров массива отдельных тел. С другой стороны, для 3D сеточных моделей сложности связаны как с заданием начальных моделей для сложных сред, так и с изменением параметров модели.

В третьем разделе приведен **обзор компьютерных технологий решения прямых и обратных задач гравиразведки**. Решение прямых и обратных задач для потенциальных полей невозможно реализовать без использования компьютерных технологий. В целом в настоящее время существует достаточно много компьютерных технологий по решению прямых и обратных задач для потенциальных полей, которые создаются практически в каждой крупной организации (компании), проводящей гравитационные и магнитные съемки. Отметим наиболее крупные системы.

*Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных COSCAD 3D (Петров А.В., РГГРУ)* Компьютерная технология COSCAD 3D включает широкий спектр программных модулей, реализующих оригинальные алгоритмы и методы решения прямых и обратных задач. В том числе - технология статистического зондирования геополей в скользящих окнах, алгоритм оценки параметров аномалиеобразующих объектов на основе модификаций метода Андреева, программы по решению прямой и обратной задач по данным гравиразведки и магниторазведки по Приезжеву И.И. и др. В COSCAD 3D есть возможность визуализации 3D данных в виде куба и его сечений.

Система ПАНГЕЯ (ЗАО Пангея), имеет много общего с технологией COSCAD 3D. Разработанная и опробованная в ряде регионов страны автоматизированная система комплексной обработки и интерпретации геолого-геофизической информации «ПАНГЕЯ», до настоящего времени была адаптирована на решение, в основном, задач нефтяной геологии. Система обеспечивает на вероятностном уровне решение широкого круга геологических задач, в частности структурно-тектонического районирования площадей по комплексу геофизических признаков методами таксономической классификации.

*Mult-Alt* (Д.Ф. Калинин, ОАО «Геотехника») используется для потенциальных полей при решении задач рудной геофизики на основе байесовского подхода Ф.М. Гольцмана, Т.Б. Калининой.

*ГРАВИПАК и КОМПАК* (В.В. Ломтадзе в ОАО «Иркутскгеология»). В последнем реализуются методы факторного анализа и метод главных компонент по атрибутам потенциальных полей.

*СИГМА-3Д* (Ю.И. Блох) позволяет строить согласованные плотностные и магнитные модели. Методика опробована при изучении кристаллического фундамента по территории Восточно-Европейской платформы. Основными комплексами в данной технологии являются программа REIST и DVOP. Комплекс программ REIST, обеспечивает построение модели субгоризонтального слоя с латерально изменяющимися намагниченностью и плотностью. Для численного решения соответствующих обратных задач построенная модель аппроксимируется совокупностью однородных



многогранников, расположенных в один слой. Пакет DVOP разработан для вычисления объемного распределения эффективной плотности и эффективной намагниченности.

*Компьютерная технология комплексной интерпретации данных сейсморазведки и гравиразведки GCIS* (Кобрунов, Петровский). Предназначена для решения прогнозно-поисковых задач на нефть и газ. Технология основана на совместном решении обратных задач сейсморазведки и гравиразведки. При этом изучаемый объект задается в виде модели слоистой среды, с априори заданными скоростными и плотностными (атрибутами). Построение согласованной сейсмоплотностной (согласование по скорости и плотности) модели среды осуществляется путем минимизации обобщенного функционала на основе интерактивного подбора.

*Технология GMSYS-3D* на основе канадского программного комплекса Geosoft представляет собой программный пакет трехмерного моделирования гравитационных и магнитных аномалий, предназначенный для модели слоистой среды. Модель формируется из имеющегося набора сеточных моделей структурных горизонтов (грид-файлов, совместимых со средой Geosoft), разделяющих слои с заданными физическими параметрами (плотности и магнитной восприимчивости). В процессе решения обратной структурной задачи программа может деформировать и двигать вверх или вниз структурный горизонт (не изменяя при этом значения плотности вышележащего и нижележащего слоев) для наилучшего подбора формы поверхности для данной модели. В целом это наиболее продвинутая среда для 3D моделирования. Но эта технология является дорогим коммерческим закрытым продуктом и так как она реализована не в рамках геоинформационной системы результат не может быть напрямую интегрирован с картографической информацией.

*VECTOR* (В.М.Новоселицкий). В системе VECTOR реализован метод обработки и интерпретации потенциальных полей, основанный на трансформациях векторов полного горизонтального градиента. Векторная трансформация и сканирование поля векторов с процедурой их последующего интегрирования (восстановления поля) позволяют провести детальное разделение источников аномалий в плане и по глубине с привязкой каждого источника к шкале эффективных глубин. К решаемым задачам относятся: пересчет поля на горизонтальную плоскость, трехмерная интерполяция, трансформация, определение интегральных характеристик возмущающих объектов. Решение прямой задачи гравиразведки в рамках принципа контактных поверхностей позволяет вычислять эффект от набора поверхностей, образующих модель среды, и подбирать (корректировать) геометрию и плотностные аномалии границ, реализовано решение трехмерной нелинейной обратной задачи гравиметрии монтажным методом.

*Технология ГИС ИНТЕГРО* реализует также построение объемных и плоских моделей, на базе аналитического обеспечения решения 2D и 3D прямых и обратных задач гравиразведки. Решение обратных задач реализовано в 2D варианте: интерактивный подбор на основе аппроксимации среды многоугольниками, метод особых точек, метод Цирюльского, а в 3D варианте: по

Андрееву, по Приезжеву, метод статистического «зондирования», метод подбора 3D среды призмами. Решение прямых задач осуществляется для призм, многогранников, пластин (горизонтальной и произвольной), шара. Кроме того, реализовано решение прямой задачи с использованием модифицированного алгоритма Приезжева И.И. ГИС ИНТЕГРО имеет 3D редактор, позволяющий визуализировать и редактировать данные в пространстве, сопоставлять 2D и 3D данные.

*Вывод:* Комплексный характер региональных исследований позволяет использовать данные, полученные другими методами (сейсморазведкой, магниторазведкой и др.), как априорные для построения плотностной модели среды. В настоящее время разработан целый ряд алгоритмов для решения 3D прямой и обратной задачи гравиразведки как для отдельных тел, так и для сеточных моделей. Опыт использования при 3D моделировании аппроксимации среды отдельными телами показал, что такая аппроксимация является трудоемкой задачей, сопряженной с большим количеством ошибок при задании параметров тел и их изменении. Практически не используется решение прямой задачи для 3D сеточных плотностных моделей, так как нет опыта задания реальной среды такими моделями по априорным данным. В то же время современные компьютерные технологии визуализации и редактирования пространственных объектов позволяют работать с довольно сложной 3D средой. Наиболее развитой системой с разнообразным аналитическим обеспечением и технологиями визуализации 3D данных, а также возможностями для интегрирования результата с другой картографической информацией является ГИС ИНТЕГРО.

## **Глава 2. Метод, методика и технология моделирования 3D плотностных моделей**

В приведенном обзоре было показано, что имеется целый ряд задач по изучению глубинного строения земной коры, которые сводятся к построению моделей слоисто-блоковой среды.

Аппроксимация среды отдельными телами и внесение изменений в параметры этих тел при подборе является трудоемким процессом. Поэтому для 3D моделирования слоисто-блоковой среды была создана методика моделирования на основе использования 3D сеточных моделей, что позволяет удобно и быстро задавать слоисто-блоковую среду и вносить изменения в начальные данные.

Для проведения моделирования был разработан *метод построения 3D сеточной слоисто-блоковой модели* (Пиманова Н.Н., Бисеркин И.А.) на основе использовании априорной информации о глубине залегания контактных поверхностей земной коры и распределении в слоях между ними физических характеристик.

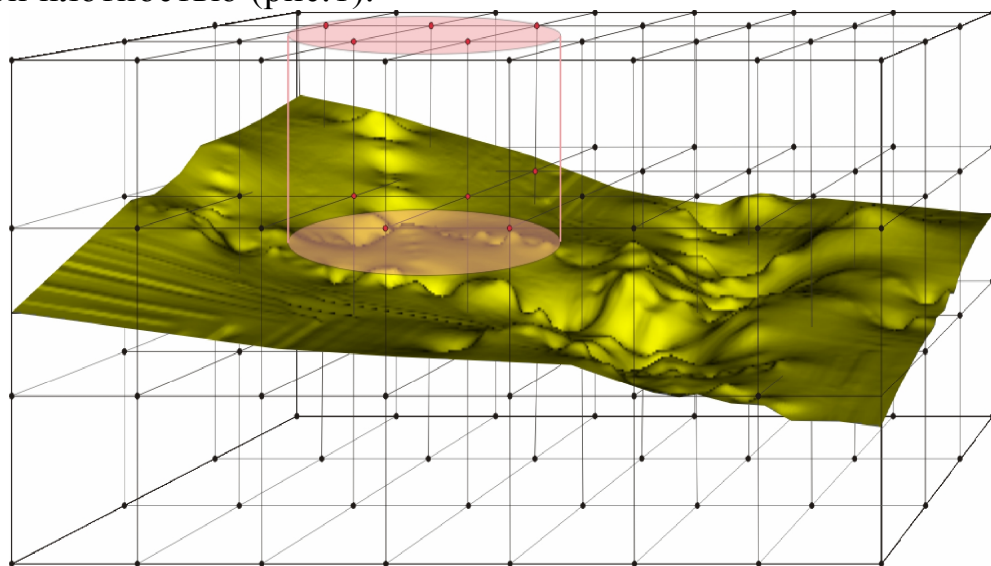
**Метод построения 3D плотностной сеточной модели** реализуется для следующих моделей среды:

- слоистой среды,
- слоисто-блоковой среды,
- слоисто-блоковой градиентной среды.

Исходными данными для построения модели в зависимости от типа среды являются:

- для слоистой среды - карты глубин залегания слоев,
- для слоисто-блоковой среды – карты глубин залегания слоев и карты распределения плотности в слоях,
- для слоисто-блоковой градиентной среды - карты глубин залегания слоев, карты распределения плотности в слоях, информация о изменении плотности с глубиной.

Построение 3D сеточной модели проводится на основе процедуры локализации в 3D сеточном кубе областей, соответствующих слоям с разной плотностью (рис.1).



*Рис.1 Локализация в 3D сеточном кубе областей, соответствующих слоям с разной плотностью.*

Для слоистой модели среды с постоянной плотностью в каждом слое обеспечивается разделение сеточного куба пространства на области, находящиеся выше и ниже заданной поверхности глубинного слоя. Такая процедура проводится для каждой поверхности, что позволяет выделить узлы 3D сетки, относящиеся к каждому слою. Затем в каждом слое задается постоянная плотность. Для этого точкам, принадлежащим определенному слою, присваивается идентификатор, которому в соответствии с априорными данными о плотности присваиваются соответствующие значения плотности.

Для слоисто-блоковой модели среды с плотностью, изменяющейся в слое по латерали в ранее построенной 3D слоистой сеточной модели в каждом слое блоки ограничиваются вертикальными поверхностями,

проведенными по изолиниям карты распределения плотности, и в результате в каждом слое локализуются области с узлами сети с разной плотностью. Таким образом, учитывается изменение плотности по латерали.

Для *слоисто-блоковой модели, с градиентным изменением* плотности по глубине устанавливается изменение плотности не только по латерали, но и от кровли слоя к его подошве.

Слоистая среда, задаваемая для моделирования может иметь:

- субпараллельные (непересекающиеся) слои,
- выклинивающиеся слои,
- слои с прерыванием мощности в небольшой области,

Основным условием является непересекаемость слоев: то есть кровля нижнего слоя не должна пересекать и оказываться выше кровли верхнего слоя.

Расчет прямой задачи от построенной по вышеизложенному методу 3D сеточной плотностной модели позволяет оценить соответствие априорных представлений наблюдаемому гравитационному полю и при необходимости провести уточнение этой модели методом подбора.

Рассмотрим основные этапы проведения подбора.

**Процесс подбора 3D сеточной плотностной модели слоисто-блоковой среды** реализуется по стандартной схеме и включает в себя 3 этапа (см. рис.2):

- этап подготовки исходных данных,
- этап проведения подбора,
- этап интерпретации полученных моделей.

Этап 1. Подготовка исходных данных и построение начальной модели. На данном этапе осуществляется подготовка исходных данных для построения 3D плотностной модели.

Для построения начальной плотностной модели необходимы данные о глубине залегания слоев в нижнем полупространстве и распределение плотности в них.

Эти данные могут быть получены из различных источников и соответственно будут иметь разный вид и будут привязаны к разным объектам пространства.

Источником данных о глубине и плотности слоев могут быть скважинные данные. Если на площади имеется сеть скважин, то в этом случае исходные данные будут заданы по неравномерной сети точек.

Начальная модель может строиться по геологическим картам рельефа залегания слоев, либо на основе общих геологических представлений о распределении плотностных неоднородностей в среде. В этом случае геолог строит контуры плотностных неоднородностей на горизонтальных сечениях разной глубины, задавая им плотность и начальные данные будут в виде векторных объектов: изолиний или контуров.

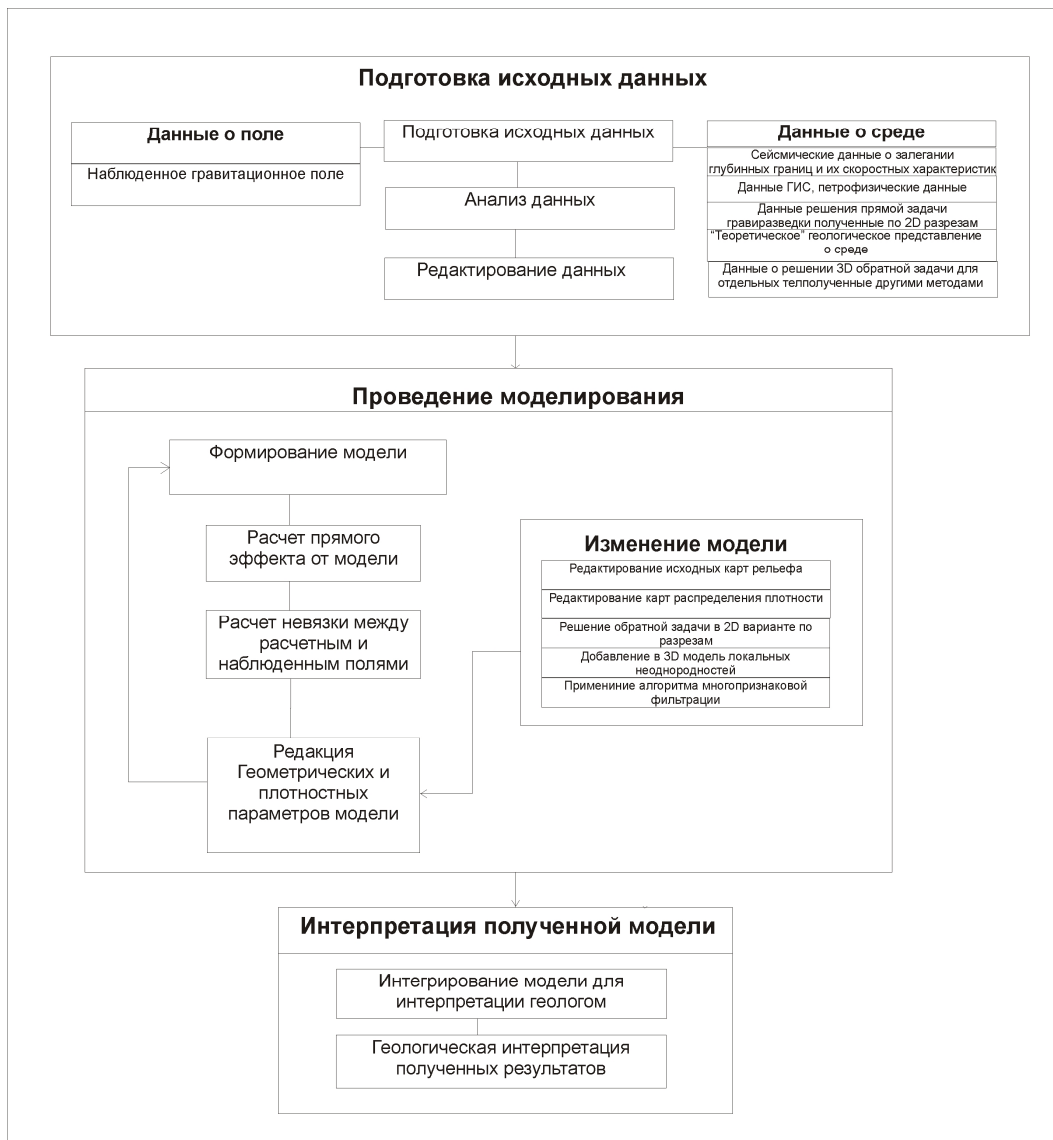


Рис. 2 Схема основных этапов проведения 3D моделирования

Исходные данные могут быть получены из результатов исследований площади другими геофизическими методами. Например, сейсморазведкой. При изучении глубинного строения земной коры используются в первую очередь данные ГСЗ о структуре земной коры и распределении скорости в ней, положении границы кора-мантия, а также корреляционная зависимость  $\sigma=f(Vp)$ , позволяющая в первом приближении оценить плотностной разрез. В данном случае исходные данные о глубине и скорости слоев будут привязаны к профилям.

Для построения начальной модели исходными данными могут служить результаты решения 2D обратной задачи гравиразведки или магниторазведки. Например, полученные в результате определения параметров отдельных аномалообразующих тел. В этом случае данные о глубине залегания верхних кромок тел и плотности также будут

распределены по неравномерной сети точек. Кроме того, исходными данными могут быть результаты подбора плотности по серии 2D разрезов.

Таким образом, на начальном этапе необходимо из исходных данных (скважинных, профильных и др.) получить карты глубины залегания слоев и распределения в них плотности. Причем данные о всех слоях нужно привести к единому размеру ячейки сети, единицам измерения, одинаковой проекции, началу координат.

Далее проводится анализ соответствия данных модели, для которой разработана технология. Как указывалось выше, кровля нижнего слоя не должна пересекать и оказываться выше кровли верхнего слоя.

Для выявления случаев, противоречащих этому условию, проводится анализ исходных данных и, если необходимо, их редактирование. Редактирование таких ситуаций проводится с удалением одной из пересекающихся поверхностей. В общем случае решение о том, какую из пересекающихся поверхностей оставить, принимает специалист, но для конкретных площадей редактирование можно проводить в автоматическом режиме задавая, какую из поверхностей оставлять в случае обнаружения таких соотношений кровли слоев.

На этом же этапе проводится подготовка, анализ и преобразование наблюдаемого гравитационного поля, необходимого для проведения подбора. Необходимо учесть, что сеть, содержащая значения гравитационного поля, должна иметь такие же параметры, как и подготовленные слои, содержащие данные о залегании глубин и плотности.

На этом этапе при необходимости возможно исключение из наблюдаемого гравитационного поля помехи или разделения поля на составляющие. В общем случае разрабатываемая методика может применяться для изучения отдельных тел и особенностей разреза. При этом случае необходимо применение статистической обработки, фильтрации данных, аналитических преобразований.

#### Этап 2. Проведение моделирования.

На этом этапе подбор осуществляется в следующей последовательности:

- построение начальной модели,
- расчет прямого эффекта от модели,
- расчет невязки между исходным и расчетным полями,
- редактирование модели, если невязка больше наперед заданной,
- расчет прямого эффекта от отредактированной модели,
- расчет невязки между исходным и расчетным полями,

И т.д.

Построение начальной модели проводится на основе априорной информации о залегании глубинных слоев и предполагаемом распределении плотности в них по описанному выше методу построения 3D плотностной сеточной модели.

Затем для построенной начальной 3D сеточной модели проводится решение прямой задачи гравиразведки методом Приезжева И.И., в ходе которой рассчитывается двумерное гравитационное поле по регулярной 2D сети.

Вычисление разности между расчетным полем от модели и наблюдаемым гравитационными полями позволяет либо закончить подбор, если невязка меньше запланированной величины, в противном случае перейти к этапу редактирования начальной модели.

В случае, если разность между подобранным и исходным полями значительная, то проводится уточнение геометрических и плотностных параметров модели. На этом этапе модель можно оперативно изменять различным образом, используя:

- редактирование исходных карт рельефа поверхностей, карт распределения плотности,
- проводя оценку параметров модели на 2D разрезах,
- путем добавления в модель локальных неоднородностей,

В последнем случае редактирование 3D плотностной сеточной модели проводится как с добавлением в модель локальных неоднородностей, представленных на 3D сетке, так и используя векторные объекты (призмы, многогранники). Расчет прямой задачи от этих тел проводится по соответствующим программам, а результат суммируется с расчетным полем от 3Dсеточной модели. При этом, если результат улучшает невязку, то векторный объект (призма, многогранник) пересчитывается на 3D сеть и затем объединяется с редактируемой плотностной моделью.

Используя такой прием, можно оперативно перебрать большое количество вариантов с разными параметрами векторных объектов и, таким образом, приблизиться к наилучшему совпадению расчетного поля суммарной 3D модели с наблюдаемым полем.

Далее рассчитывается прямой эффект от отредактированной модели и невязка между расчетным и наблюдаемым полями. Вычисление разности между расчетным полем от модели и наблюдаемым гравитационными полями позволяет либо закончить подбор, если невязка меньше запланированной величины, или вновь перейти к этапу редакции модели.

### 3 Этап. Интерпретация полученной модели.

На этом этапе проводится интегрирование полученной модели, так как для целей интерпретации геологом необходимо предусмотреть перевод сеточной модели в модель с отдельными телами, характеризующимися разной плотностью, так как для анализа она будет более удобна. Затем проводится прогноз вещественного состава по плотности, полученной в модели.

**Технология**, реализующая построение 3D сеточных плотностных моделей для слоистой и слоисто-блоковой среды, с различным характером изменения физических свойств в слоях реализована в ГИС ИНТЕГРО, в которой имеются основные блоки, необходимые для ее реализации (блок аналитических функций,

блок картографических преобразований и др.) и которые функционируют в ГИС среде.

В аналитическом обеспечении ГИС ИНТЕГРО присутствуют: программы решения прямой задачи для 3D сеточных моделей (алгоритм Приезжева И.И.) и для отдельных тел (призм, многогранников, пластин, сфер, уступов и др.), а также для решения обратной задачи как в 2D варианте, так и с получением 3D распределения плотности (статистическое и корреляционное зондирование, вейвлет-анализ, метод Андреева, Приезжева И.И. и др.). Кроме того, в технологии используются программы интерполяции, разработанный специальный модуль для формирования 3D сети по набору двумерных поверхностей, программа пересчета объемных векторных объектов в сеточную форму и др.

В ГИС ИНТЕГРО имеются технологические средства, обеспечивающие визуализацию и анализ 3D моделей, совместный анализ трехмерных данных с 2D моделями, а также их сопоставление с геологическими картами, скважинными данными, данными о глубинных поверхностях и т.д.

Технологические средства ГИС ИНТЕГРО осуществляют:

- представление 3D сеточных моделей в виде кубов, горизонтальных и вертикальных сечений

- визуализацию 3D моделей в виде отдельных тел, поверхностей

- геометризацию моделей в вертикальных, горизонтальных плоскостях и в объеме

- сопоставление 3D моделей полученных разными методами

- сопоставление 3D моделей (представленных сеточными моделями, поверхностями, телами) и 2D моделей

- отображение физических свойств на поверхности слоев. Данные, представляющие собой пространственную информацию по поверхностям и разрезам (сечениям) могут быть изображены в 3D визуализаторе как композиция физических свойств и геометрии. Например, подобные композиции физических свойств могут отображаться не плоско по сечениям, а укладываться непосредственно на 3D поверхность соответствующих слоев.

- сечение 3D модели заданной поверхностью

Визуализатор 3D реализует представление моделей в виде залитых поверхностей, каркаса, объема, сечений, помимо этого визуализатор осуществляет управление шкалой раскраски, изменением масштабов по x, y, z, управление прозрачностью 3D объектов.

*Вывод:* Предложенная технология формирования 3D блоково-слоистых моделей с использованием ГИС ИНТЕГРО позволяет с наименьшими затратами труда корректировать параметры плотностной модели и проводить плотностное моделирование.

**Глава 3. Детализация плотностной модели земной коры на основе многопризнаковой фильтрации в среде ГИС-ИНТЕГРО.**

В главе описывается способ детализации плотностной модели земной коры на основе многопризнаковой фильтрации (Никитин А.А.) с целью уточнения местоположения границ в земной коре.



Рассматриваемый подход к построению плотностной модели земной коры основывается на пересчете данных гравитационной съемки в нижнее полупространство с использованием алгоритмов Приезжева И.И. и др. Результаты такого пересчета обеспечивают построение глубинного разреза избыточной (эффективной) плотности. При наличии сведений о значениях плотности по данным скважин в осадочном чехле и принятого значения плотности на границе Мохоровичича в 3,2 г/см<sup>3</sup> составляется регрессионная зависимость, как правило, линейная на основе которой разрез эффективной плотности переводится в разрез истинной плотности. В то же время, ввиду неоднозначности решения обратной задачи гравиразведки, в частности при одновременной оценке плотности и мощности плоскопараллельного слоя, определение горизонтальных границ в разрезе является плохо обусловленным, кроме поверхности фундамента. Поверхность фундамента, как правило, отличается существенной контрастностью вышележащего осадочного чехла по плотности и определение поверхности фундамента оценивается по характеру особых точек при пересчете гравитационного поля в нижнее полупространство.

При определении местоположения границ земной коры К1, К2 и Мохоровичича используются установленные по данным глубинного сейсмического зондирования, и расчета второй горизонтальной производной. Вычисление производных и градиентов производится по значениям поля, попавшим в скользящее окно, форма и размеры которого определяются пользователем. При каждом положении скользящего окна исходное поле в нем методом наименьших квадратов аппроксимируется полиномом второго порядка:  $F = C_0 + C_X * X + C_Y * Y + C_{XY} * X * Y + C_{XX} * X^2 + C_{YY} * Y^2$ . Производные в ряде случаев позволяет приближаться к горизонтальным границам глубинного разреза, определяемым по данным сейсморазведки МОВ-КМПВ и ГСЗ. Однако, при этом неоднозначность определения границ контактных поверхностей (Ф-фундамент, К1, К2 и М-Мохоровичича) остается достаточно высокой.

При детализации плотностной модели земной коры, с целью, более однозначного определения границ контактных поверхностей, предлагается использование алгоритма многопризнаковой фильтрации, а ввод-вывод данных, расчет эффективной плотности и получение графических изображений плотностной модели реализуется в среде ГИС-Интегро.

**Алгоритм многопризнаковой фильтрации.** Алгоритм многопризнаковой фильтрации проводится по сети профилей и сводится к двухэтапной процедуре метода главных компонент. На первом этапе осуществляется вычисление первой главной компоненты по комплексу атрибутов для каждого профиля сети в отдельности, т.е. как при традиционном варианте (в качестве атрибутов используются результаты пересчета поля каждого поля) метода. На втором этапе проводится расчёт первой главной компоненты для уже полученных первых компонент по каждому профилю, что позволяет учесть корреляционные связи между атрибутами по всей площади наблюдений. При этом образуется матрица размерности  $n \times N$  из таких главных компонент:

$$\begin{pmatrix} Y_{111} & Y_{112} & \dots & Y_{11N} \\ Y_{121} & Y_{122} & \dots & Y_{12N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{1n1} & Y_{1n2} & \dots & Y_{1nN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

В матрице (1) первый индекс указывает на значение первой главной компоненты, второй индекс – на номер пикета, а третий индекс – на номер профиля.

Далее проводится расчёт коэффициентов корреляции между любыми парами главных компонент и построение по этим коэффициентам корреляционной матрицы  $R$  размерностью  $N \times N$ :

$$[R] = \begin{pmatrix} 1 & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & 1 & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad R_{ij} = R_{ji} \quad (2)$$

В матрице (2) индекс для первых главных компонент опущен.

Для матрицы (2) вычисляется максимальное собственное значение  $\lambda_{\max}$ , которое характеризует энергетическое отношение сигнал/помеха уже в многоатрибутном пространстве по всей площади наблюдений.

Нахождение значений собственного вектора  $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})$  матрицы (2), соответствующего  $\lambda_{\max}$ , реализуется из системы линейных уравнений (3):

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda_{\max} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & 1 - \lambda_{\max} & \dots & R_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & 1 - \lambda_{\max} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \dots \\ a_{1N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Определенность решения системы линейных уравнений (3) при равенстве всех уравнений в правой их части нулю обеспечивается нормировкой  $\sum_{j=1}^N a_{ij}^2 = 1$ . Значения собственного вектора  $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})$  характеризуют весовые коэффициенты каждого профиля в многоатрибутном пространстве.

Для нахождения аналогичных весовых коэффициентов для каждого пикета сети наблюдений осуществляется путем умножения вектора-столба  $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})^T$  на матрицу (1):

$$\begin{pmatrix} Y_{111} & Y_{112} & \dots & Y_{11N} \\ Y_{121} & Y_{122} & \dots & Y_{12N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{1n1} & Y_{1n2} & \dots & Y_{1nN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \dots \\ a_{1N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \dots \\ b_{n1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Результатом перемножения таких матриц являются значения  $(b_{11}, b_{n1}, \dots, b_{n1})$ , которые характеризуют вес каждого пикета в многоатрибутном пространстве.

Расчет комплексного параметра для  $L$ -атрибутов ( $L$ -геополей) по сети  $n \times N$  точек площади наблюдений осуществляется путем перемножения

вектора-столба весовых коэффициентов для каждого пикета  $(b_{11}, b_{n1}, \dots, b_{n1})^T$  на вектор-строку весовых коэффициентов каждого профиля  $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N})$ , т.е.

$$\begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \dots \\ b_{n1} \end{pmatrix} (a_{11} \quad a_{12} \quad \dots \quad a_{1N}) = \begin{pmatrix} b_{11}a_{11} & a_{11}a_{12} & \dots & b_{11}a_{1N} \\ b_{21}a_{11} & b_{21}a_{12} & \dots & b_{21}a_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1}a_{11} & b_{n1}a_{12} & \dots & b_{n1}a_{1N} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Описанные процедуры расчета комплексного параметра используются для наблюдения  $L$ -геофизических полей при их съемке с поверхности по  $N$ -профилям, обеспечивая выделение наиболее энергетически выраженной области в пространстве измеренных полей, или иначе – перспективного аномального объекта.

**Методика применения алгоритма многопрофильной фильтрации для уточнения плотностной модели земной коры.** Для работы алгоритма в качестве атрибутов берется серия глубинных разрезов построенных путем пересчета исходного гравитационного поля. Образованная таким образом серия разрезов эффективной плотности принимается за комплекс признаков, для которых реализуется алгоритм многопризнаковой фильтрации.

Алгоритм многопризнаковой фильтрации при уточнении плотностной модели по сети или многоатрибутного анализа по сети профилей сводится, как указано выше, к двухэтапной процедуре метода главных компонент. На первом этапе осуществляется вычисление первой главной компоненты по комплексу данных пересчета гравитационного поля атрибутов для каждого профиля сети в отдельности. На втором этапе проводится расчёт первой главной компоненты для уже полученных первых компонент по каждому профилю, значения этой «новой главной компоненты оценивает вес т.е., «вклад» каждой точки глубинного профиля в общую дисперсию комплексного параметра». Умножая матрицу первых главных компонент, полученных на первом этапе, на значения новой главной компоненты, получает матрицу-столбец, значения которой оценивают вес(вклад) уже каждого глубинного профиля в общую дисперсию (энергию) комплексного параметра. Перемножение этого вектора-столбца на вектор-строку обеспечивают возвращение полученных результатов к матрице исходной размерности. Полученные результаты после работы алгоритма позволяют, с одной стороны, накопить информацию о плотностном разрезе, с другой стороны, учесть корреляционные связи значений эффективной плотности в объеме изучаемой геосреды. Таким образом, создаются объективные предпосылки для более однозначной оценки глубин контактных поверхностей.

Сопоставление границ контактных поверхностей определенных путем многопризнаковой фильтрации по данным ГСЗ, свидетельствует о возможности детализации плотностной модели по установлению границ фундамента и межкоровых контактных поверхностей, а также уточнив блоковое строение земной коры

#### Глава 4. Применение технологии построения плотностной слоисто-блоковой 3D модели на примере Байкитской антеклизы

Практическое использование разработанной технологии приводится на примере построения 3D блоково-слоистой модели строения земной коры юга Восточной Сибири в районе Байкитской антеклизы.

Для построения 3D плотностной модели использовались сейсмические данные по сети профилей ГСЗ и профилей МОВ-ОСТ, расположенных в этом районе (опорные профили 1-СБ, 3-СБ, профили ГСЗ Батолит, Кимберлит, Рифт1, Рифт-5, Метеорит) о залегании кровли глубинных поверхностей в земной коре. Кроме того, были использованы данные о распределении скорости в земной коре на сейсмических профилях, по которым была рассчитана плотность в глубинных слоях с использованием корреляционных связей между скоростью и плотностью.

На этапе подготовки исходных данных был построен комплект карт глубин залегания глубинных поверхностей (поверхностей осадочной толщи, фундамента, Мохо и внутрикоровых К1, К2) и распределения плотности на них. Карты были получены на основе интерполяции сейсмических данных по сети профилей ГСЗ(рис.3).

На втором этапе по этим данным была построена начальная 3D плотностная сеточная блоково-слоистая модель по сети 2\*2\*1 км. Для этой модели была решена прямая задача, с использованием модифицированного алгоритма И.И. Приезжева. Сравнение исходного и расчетного полей показало сильное расхождение между ними и необходимость корректировки плотностной модели. Анализ невязки полей показал, что в юго-западной части площади должны присутствовать более плотные массы, в северо-восточной и центральной – менее плотные. Амплитуда невязки показывает, что это должны быть довольно мощные аномалиеобразующие тела, залегающие, скорее всего, ниже фундамента.

Кроме того, анализ исходного и расчетного полей показал региональный характер плотностной модели, полученной по данным ГСЗ, в котором практически отсутствуют неоднородности, вызывающие локальные аномалии гравитационного поля.

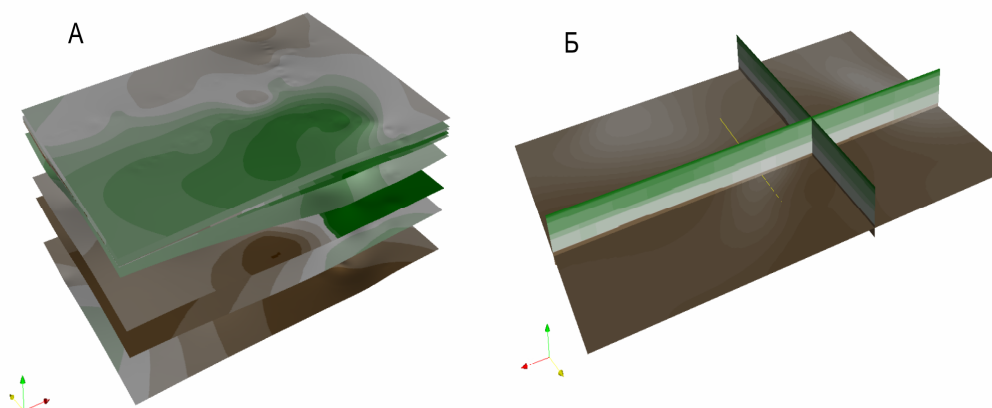
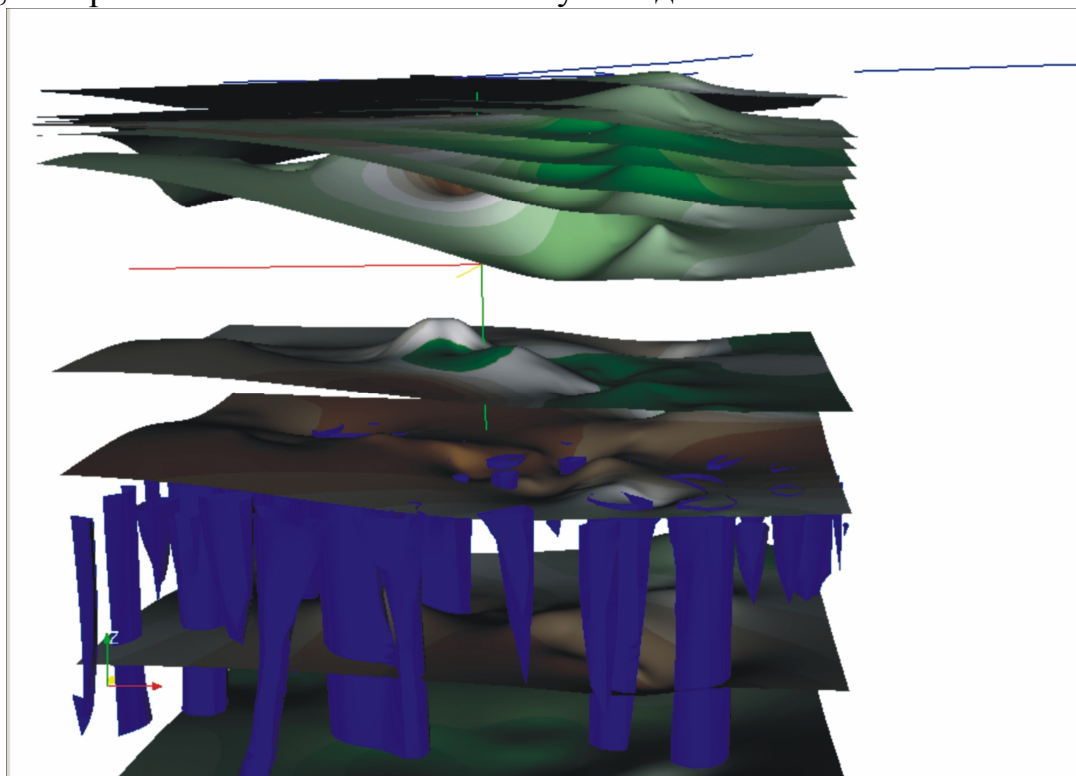


Рис. 3. Исходные глубинные поверхности с распределением плотности на них (а) и 3D плотностная блоково- слоистая модель (б)

Поэтому было проведено уточнение плотностной модели. Уточнение проводилось в двумерном варианте по серии профилей, пересекающих всю площадь исследований, по которым были получены вертикальные сечения 3D плотностной модели с распределением плотности в земной коре. Для этих сечений была проведена оценка плотности для каждого из глубинных слоев. Корректировка модели проводилась методом 2D подбора до получения наилучшего совпадения расчетного поля с наблюдаемым. Затем плотности, полученные для каждого слоя по серии профилей, интерполировались. На основе полученных данных были скорректированы исходные карты распределения плотности на поверхности глубинных слоев, которые были использованы ранее при построении начальной 3D плотностной модели. Затем на основе уточненных карт распределения плотности была получена новая 3D сеточная плотностная модель, для которой был рассчитан гравитационный эффект. Его сравнение с наблюдаемым полем показало хорошую сходимость.

На втором этапе для детализации 3D плотностной модели и включения в нее локальных неоднородностей из наблюдаемого поля был вычтен гравитационный эффект от уточненной 3D плотностной модели. Затем для разности полей была решена обратная задача и построены 3D локальные плотностные неоднородности во всем объеме земной коры. В качестве примера на рисунке 4 показаны локальные объемные тела по слою 30км - поверхность Мохо, которые были включены в итоговую модель.



*Рис. 4. Локальные тела, полученные по методу Приезжева, которые были добавлены при уточнении плотностной модели*

Гравитационный эффект, рассчитанный от нее, показал хорошее совпадение с наблюдаемым полем.

Для полученной 3D плотностной модели были построены горизонтальные сечения, характеризующие распределение плотности в основных глубинных слоях. Их анализ позволил разделить фундамент Байкитской антеклизы на две области, отличающиеся по плотности пород: северо-западную (с плотностью пород до  $2.8 \text{ г/см}^3$ ) и юго-восточную (с плотностью пород  $2.68\text{-}2.70 \text{ г/см}^3$ ). Это свидетельствует о том, что восточная часть антеклизы сложена породами более кислого состава с внедрениями гранитоидов, а в западной части ее фундамент насыщен интрузиями основного и ультраосновного состава. Анализ более глубоких сечений плотностной модели позволил выделить в средней и нижней части земной коры Байкитской антеклизы внутрикоровые зоны разуплотнений, а также участки проработанные магматизмом основного и ультраосновного состава.

Сравнение начальной и подобранной плотностной моделей позволяет говорить о наличии в центральной части площади обширной области разуплотнения, простирающейся от поверхности фундамента до низов земной коры. Можно предположить, что такое расхождение модели по ГСЗ и подобранной в результате работы может быть связано как с неточностями в определении скоростей для глубинных горизонтов земной коры при проведении ГСЗ, так и с недоучетом факторов, влияющих на плотность при получении ее на основе корреляционной связи со скоростью. Возможно, что это расхождение отражает особенности геологических процессов, которые приводят к изменению связи между плотностью и скоростью.

Для исследуемой площади было проведено уточнение положения субгоризонтальных глубинных границ. Детализация плотностной модели проводилась с помощью алгоритма многопризнаковой фильтрации.

На изучаемой территории в качестве исходных данных использовалась серия (ансамбль) глубинных разрезов эффективной плотности, построенных из 3D плотностной модели, полученной в окрестности опорного (регионального) профиля в количестве 15-20 и расположенных друг от друга на расстоянии 2км. При этом дискретность разреза по глубине составляет 500м. При глубине разреза 40 км, образовано 80 дискретных уровней (глубинных разрезов). Таким образом, исходная информация при длине опорного профиля в 200км, была представлена в виде матрицы размером  $100 \times 80$ , а их общее число профилей составило 15-20. Образованная таким образом серия разрезов эффективной плотности, принималась за комплекс признаков, для которых реализовывался алгоритм многопризнаковой фильтрации.

Реализация алгоритма многопризнаковой фильтрации для серии (ансамбля) глубинных разрезов плотности, позволила, с одной стороны, накопить информацию о плотностном разрезе, с другой стороны, учесть корреляционные связи значений плотности в объеме изучаемой геосреды. Таким образом, были созданы объективные предпосылки для более однозначной оценки глубин залегания контактных поверхностей.

Таким образом, в результате применения разработанной технологии была построена 3D плотностная блоково-слоистая модель земной коры района

Байкитской антеклизы, расположенной на юго-западе Восточно-Сибирской платформы, которая позволила уточнить геологическое строение этого региона.

### **Заключение**

Основным результатом исследований, в диссертационной работы, является предложенный метод формирования 3D сеточной модели слоисто-блоковой среды земной коры на основе использования структурных карт контактных поверхностей и распределения плотностей в каждом слое, что обеспечило эффективное решение прямой задачи.

Кроме того предложена технология плотностного моделирования земной коры на основе использования сеточных моделей, включающая метод формирования 3D сеточных моделей слоисто-блоковой среды с сочетанием векторного и сеточного представления геолого-геофизических данных. Данная технология позволила проводить редакцию моделей с использованием функций 3D редактора ГИС-Интегро, и осуществить интерактивный подбор 3D плотностных моделей, что обеспечило решение обратной задачи гравirazведки, адекватное реальной среде.

Технология построения плотностной 3D модели земной коры, включающая метод формирования 3D сеточных моделей слоисто-блоковой среды, позволяет проводить редакцию моделей с использованием функций 3D редактора ГИС-Интегро и обеспечивает решение обратной задачи гравirazведки по созданию моделей, адекватных реальным средам.

Реализован метод многопризнаковой фильтрации для детализации плотностной модели.

Указанные методы и технологии были апробированы при изучении строения земной коры по территории юго-западной части Восточной Сибири.

### **Список основных работ по теме диссертации**

1. Бисеркин И. А. Перспективы поисков УВ на юге Восточной Сибири по результатам обработки геолого-геофизических данных в ГИС-системах/ Геоинформатика, 2012, N № 3. с.8-19.

2. Бисеркин И.А. Федотов В.А. Детализация плотностной модели с помощью алгоритма многопризнаковой фильтрации. Геоинформатика.2013, N №3. с.63-66.

3. Бисеркин И.А. Построение пространственной плотностной модели для Юго-Восточной части Сибири. //Материалы Конференции «Новые идеи в науках о земле» г. Москва

4. Лобанов А.М., Филатов В.Г., Бисеркин И.А., Беленький Е.А. Компенсационный метод-помеха для повышения точности измерений в гравirazведке. Известия высших учебных заведений Геология и Разведка 2011, N №5. с.103 -105.

5.Р.П. Готтих, Б.И. Писоцкий, В.И. Галуев, С.С. Малинина, Бисеркин И.А.

Особенности состава, структуры и процессов формирования консолидированной земной коры крупной зоны нефтегазонакопления (На примере Байкитской антеклизы Сибирской платформы) 18ая Международная конференция «Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы» (Воронеж 2012), с.90-93.