

На правах рукописи  
УДК 550.834

ЗИНОВКИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ  
ПЛОТНОСТНЫХ И МАГНИТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ  
ПО ДАННЫМ ГРАВИ- И МАГНИТОРАЗВЕДКИ**

Специальность 25.00.10  
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА 2011

Работа выполнена на кафедре геофизики Российского Государственного Геологоразведочного Университета им. Серго Оржоникидзе (РГГРУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Петров Алексей  
Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук Галуев  
Владимир Иванович  
(ФГУП ГНЦ РФ ВНИИГеосистем)

кандидат технических наук  
Трусов Алексей Андреевич  
(ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика»)

Ведущая организация: ФГУНПП "Аэрогеология"

Защита состоится « 19 » мая в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском Государственном Геологоразведочном Университете по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, РГГРУ, ауд. 6-38.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского Государственного Геологоразведочного Университета.

Автореферат разослан « 15 » апреля 2011г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.121.07, доктор  
физико-математических наук, профессор



А.Д. Каринский

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Объемная геологическая модель является отображением изучаемого блока земной коры в виде совокупности трехмерных геометрических тел, наделенных широчайшим спектром свойств, включая геологические, петрофизические, геохимические и т.д., при этом решение задачи построения достоверной (адекватной и эффективной) геолого-геофизической модели всегда представляет основную цель геологоразведочного производства.

Реальное достижение этой цели стало возможным именно в настоящее время, когда производительность вычислительной техники, возможности средств визуализации и уровень теоретических исследований в области решения прямых и обратных задач геофизики стали соответствовать сложности задач, решаемых непосредственно в процессе моделирования. Отметим, что если раньше геолого-геофизическое моделирование в основном использовалось при поисках месторождений нефти и газа, в достаточно простых геологических условиях слоистых сред, то сегодня становится актуальной задача моделирования сложных высокогетерогенных геологических сред с сильной дифференциацией свойств горных пород в пространстве.

Построение плотностных и магнитных моделей земной коры представляет особую актуальность в связи с тем, что данные гравиразведки и магниторазведки в масштабе 1:200 000 получены практически по всей территории Российской Федерации, а для ряда площадей получены в масштабе 1:50 000. Кроме этого, плотностные модели представляют основу прогноза поисковых исследований на углеводородное сырье и твердые полезные ископаемые при изучении осадочного чехла и кристаллического фундамента. Эффективное решение задачи расчленения пород кристаллического фундамента невозможно без оценки распределения магнитной восприимчивости с глубиной.

Технология построения плотностных и магнитных моделей не возможна без использования способов решения прямых и обратных задач грави- и магниторазведки. Имеющая неоднозначность решения обратных задач грави- и магниторазведки при построении плотностных и магнитных моделей может быть существенно снижена как путем включения в процесс моделирования априорной геолого-геофизической информации о строении земной коры, так и использования современных методов спектрального, корреляционного, регрессионного анализа, оптимальной фильтрации, алгоритмов кластерного анализа и распознавания образов.

Таким образом, создание компьютерной технологии построения эффективных и адекватных плотностных и магнитных моделей земной коры представляет актуальную задачу.

**Цели и задачи исследования.** Создание компьютерной технологии

построения плотностных и магнитных моделей земной коры в двухмерной (2D) и трехмерной пространствах (2½D и 3D) является основной целью исследований. Достижение цели базируется на решении следующих задач:

- построение оптимальной структуры базы данных для процесса моделирования и соответствующей программной реализации;
- разработка оригинальных алгоритмов редактирования геометрических и физических характеристик модели;
- разработка приемов решения прямых задач и методов оценки параметров аномалиеобразующих объектов на основе сверточной модели в пространстве и в спектральной области;
- использование методов кластерного анализа и распознавания образов в процессе моделирования.

**Методологическую основу исследования** составляют современные методы математического анализа, теории вероятностей, статистических оценок, многомерной статистики, теории случайных процессов, кластерного анализа, спектрально-корреляционного анализа, оптимальной фильтрации, системного и объектно-ориентированного программирования, вычислительные методы.

**Научная новизна исследований определяется:**

- разработкой оригинальных алгоритмов решения прямой задачи грави- и магниторазведки на основе сверточной модели для точечных масс;
- включением в процесс построения плотностных и магнитных моделей методов автоматической и интерактивной классификации;
- программной реализацией процедуры построения плотностных и магнитных моделей;
- созданием плотностных моделей глубинного строения земной коры по опорным региональным профилям, адекватных реальным средам.

**Защищаемые положения:**

1. Разработанная компьютерная технология построения плотностных и магнитных моделей земной коры, включающая алгоритмы решения прямых задач грави- и магниторазведки на основе сверточной модели для точечных масс, процедуры интерактивного редактирования моделей, графического представления результатов моделирования, оценки эффективности и согласованности модельных построений, обеспечивает построение двухмерных и трехмерных плотностных и магнитных моделей земной коры.
2. Предложенная методика построения плотностных и магнитных моделей первого приближения, базирующаяся на оригинальных методах оценки параметров аномалиеобразующих объектов, алгоритмах автоматической и интерактивной классификации, позволяет повысить эффективность

создания согласованных физико-геологических моделей земной коры.

3. Использование созданной компьютерной технологии гравимагнитного моделирования позволяет строить эффективные по плотности и магнитной восприимчивости модели глубинного строения земной коры для высокогетерогенных слоисто-блоковых сред кристаллического фундамента и осадочного чехла.

**Личный вклад.** Все положения, выносимые на защиту, выполнены автором или при его непосредственном участии. Автором проведены исследования по разработке оригинальных алгоритмов решения прямых задач гравиразведки и магниторазведки для сеточных моделей. Разработана методика построения плотностных и магнитных моделей земной коры. Создано программное обеспечение для редактирования модельных построений. Разработан оригинальный интерфейс и база данных для сопровождения модельных построений и визуализации результатов моделирования.

В работе использованы адаптированные процедуры трансформаций гравитационного и магнитного полей в спектральной области, предоставленные И.И. Приезжевым, которые используются при решении прямых задач и для оценки параметров аномалиеобразующих объектов.

**Практическая ценность** работы состоит в создании компьютерной технологии по созданию плотностных и магнитных моделей, обеспечивающей обработку данных грави- и магниторазведки в режиме реального времени и внедрением программно-алгоритмического обеспечения во ВСЕГЕИ и РГГРУ.

**Апробация работы.** Основные результаты проводимых исследований, изложенных в работе, докладывались на 33-й, 34-й, 35-й и 37-й сессиях Международного семинара им. Д.Г. Успенского (2006-2008 и 2010гг.), X Международной конференции Новые идеи в науках о Земле (Москва, 2011г.). По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 в реферируемых журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 122 страниц, в том числе 45 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 78 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору Петрову Алексею Владимировичу и доктору физико-математических, заведующему кафедры геофизики, профессору Никитину Алексею Алексеевичу за внимание, помощь и поддержку, советы и ценные замечания, оказываемые за годы совместной работы; специалистам ВСЕГЕИ Мильштейн Е.Д. и Каличевой Т.И.

за консультации и конструктивную критику; сотрудникам геофизического факультета РГГРУ за моральную поддержку.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель исследования и его основные задачи, указаны научная новизна и положения, выносимые на защиту, приведены сведения о практической ценности.

**В первой главе** представлен обзор основных принципов, существующих компьютерных технологий и используемых методов построения геолого-геофизических моделей по данным потенциальных полей.

Потенциальные (магнитное и гравитационное) поля обеспечивают существенную дополнительную информацию о магнитных и плотностных неоднородностях земной коры, структурно-тектоническом строении изучаемых регионов, как с поверхности Земли, так и по разрезу земной коры.

Методика обработки гравитационных и магнитных полей в настоящее время достаточно проработана и, по существу, сведена к стандартному графу [Никитин А.А., 2007]. При этом учитывается существенно нестационарный характер потенциальных полей, когда среднее значение поля, его дисперсия и корреляционные (спектральные) свойства претерпевают изменения, как вдоль одиночных профилей, так и по площади съемки.

Для оценки изменения статистических и градиентных атрибутов по глубине разреза земной коры А.В. Петровым предложена методика их статистического зондирования. Результатом такого зондирования является создание трехмерных сетей, состоящих из отдельных слоев, полученных путем расчета того или иного атрибута при конкретном размере скользящего окна.

Количественная интерпретация данных гравитационных и магнитных полей осуществляется с целью получения распределения в плоскости разреза земной коры эффективных значений плотности и намагниченности. Для этого также используется построение их объемных моделей. Трехмерные модели распределения эффективных значений плотности и намагниченности строятся путем вычисления трансформант гравитационного и магнитного полей, по алгоритмам И.И. Приезжаева (по пересчету полей в нижнее полупространство в спектральной области) [Приезжев И.И., 2005], Ю.И. Блоха (построение 3D-распределение эффективных источников магнитных масс) [Блох Ю.И., 2003], А.В. Петрова (модифицированный метод Б.А. Андреева) [Петров А.В., 2007].

Приведенными выше моделями описываются распределения избыточных физических свойств изучаемой геосреды в земной коре. Для получения непосредственно плотностной модели земной коры проводится нормирование эффективных значений плотности и построение плотностного разреза с учетом изменения плотности с глубиной. Обычно при этом задается линейный тренд плотностной характеристики среды при увеличении плотности

с глубиной [Галуев В.И. 2009].

Качество плотностных и магнитных моделей оценивается путем решения прямой задачи от полученных распределений гравитирующих и магнитных масс, а совпадение формы и характера наблюдаемого и теоретически рассчитанного полей свидетельствует о правомерности использования изложенных выше подходов к зондированию потенциальных полей.

В работе приведен обзор компьютерных систем построения согласованных моделей по геофизическим данным: ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА, GCIS, СИГМА-3D, DV-Geo; а также монометодных систем интерактивного построения гравимагнитных моделей GeoSoft GM-SYS, BRGM 3D GeoModeller и КОСКАД 3D.

**Во второй главе** рассматриваются основные теоретические сведения о используемых в работе способах решения прямых и обратных задач грави- и магниторазведки; определения кластерного анализа и описания разработанных алгоритмов кластеризации; сведения об интерполяционных алгоритмах, используемых в работе.

Рассмотрим интегральное представление потенциала гравитационных масс, распределенных в области  $V$ :

$$U(x, y, z) = f \int_V \frac{\sigma(\xi, \eta, \zeta) dV}{\sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2}}.$$

Эта формула является основной при решении прямых задач для различных трехмерных геологических объектов. Дифференцируя ее можно получать интегральные соотношения для любых элементов гравитационного поля. Наибольшее практическое применение при интерпретации гравитационных аномалий имеет аномалия ускорения силы тяжести  $\Delta g$ , которая отождествляется с  $U_z$ :

$$U_z(x, y, z) = f \int_V \frac{\sigma(\xi, \eta, \zeta)(\zeta - z) dV}{\left( (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2 \right)^{3/2}}.$$

Возможности современной вычислительной техники позволяют отказаться от представления модели в виде набора многоугольников или призм, позволяющих сократить время решения прямых задач, но усложняющих процедуру редактирования моделей, и перейти к более эффективным и удобным для редактирования – равномерным сеточным моделям. В этом случае исследуемое пространство разбивается на элементарные объемы, каждый из которых наделяется плотностными свойствами. В общем случае требуется решение прямой задачи от источников, расположенных в узлах трехмерной регулярной сети. В качестве источников можно использовать точечные источники, стержни или прямоугольные параллелепипеды. Для модели на площади 100x100км с шагом 0.1км и 10км в глубину требуется  $\approx 10^{14}$  кратное

решение прямой задачи (в этом случае число пикетов  $n=1001$ , число профилей  $m=1001$ , число слоев  $ns=101$ ):

$$\Delta g_{i,j} = V \sum_{k=1}^{ns} \sum_{p=1}^n \sum_{r=1}^m \frac{\sigma_{p,r,k}(\zeta - z)}{\left[ (\xi - z)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m.$$

Учитывая вычислительную сложность (даже для точечного источника, необходимо произвести операции деления и возведения в степень с дробным показателем), расчет прямой задачи займет достаточно продолжительное время. Поэтому процесс расчета прямой задачи для таких моделей необходимо ускорить.

Значительный прирост скорости можно получить за счет послойного решения прямой задачи. Для источников, расположенных на одной глубине  $z_0$ , форма аномалии одинаковая, и следовательно, гравитационный эффект слоя  $\Delta g(x, y)|_{z=const}$  можно выразить в виде свертки плотностей  $\sigma(x, y, z_0)$  этого слоя и поля точечного источника  $K(x, y, z - z_0)$ , расположенного на глубине слоя:

$$\Delta g(x, y)|_{z=const} = \sigma(x, y, z_0) * K(x, y, z - z_0) = \iint_{R^2} \sigma(x, y, z_0) K(x - t, y - q, z - z_0) dt dq.$$

Для регулярной сети, содержащей  $m$  профилей по  $n$  пикетов, получим:

$$\Delta g_{i,j}|_{z=const} = \sum_{p=1}^m \sum_{r=1}^n \sigma_{p,r} \cdot K_{i-p, j-r}(z - z_0),$$

где  $i = 1 \dots m, j = 1 \dots n$ . При этом количество сложных вычислительных операций (расчет матриц  $K$ ), требующих значительного машинного времени, сокращается до  $\approx 10^8$  (для всего куба), а количество простых операций – сложение и умножение остается  $\approx 10^{14}$ . Схема вычислений проиллюстрирована на рис. 1.

Еще больший прирост скорости можно получить, если выполнять свертки в частотной области. Здесь потребуется  $\approx 3 \cdot 10^2$  быстрых двумерных преобразований Фурье и  $\approx 10^8$  операций умножения.

**Прямые задачи в спектральной области.** Прямая задача в разведочной геофизике в общей постановке для статических полей на плоскости  $z_0=const$  определяется следующим образом:

$$\varphi(x_0, y_0, z_0 = const) = P \iiint_V \sigma(x, y, z) K(x - x_0, y - y_0, z - z_0) dx dy dz,$$

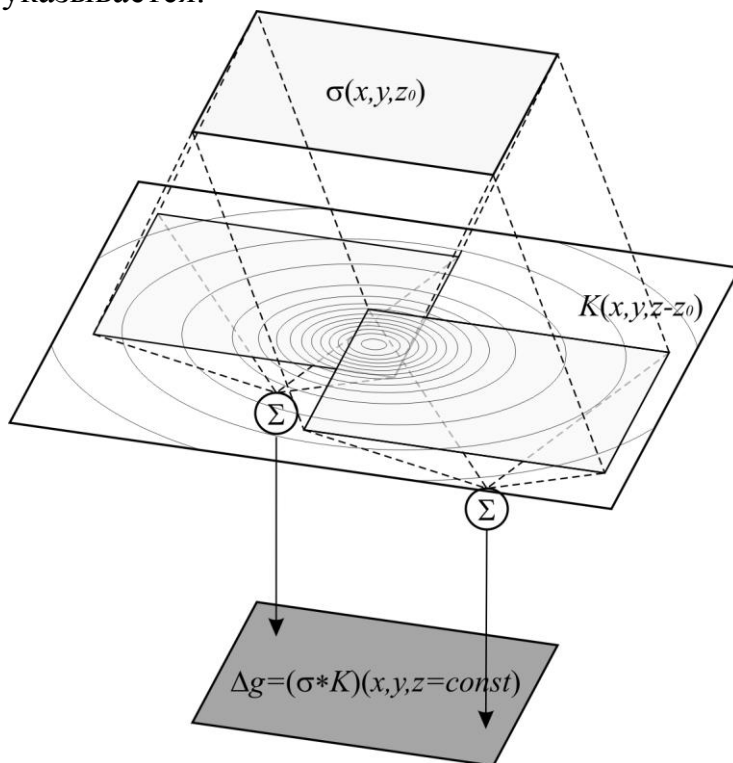
где  $\varphi(x_0, y_0, z_0 = const)$  - наблюдаемая функция физического поля;

$\sigma(x, y, z)$  - функция физического параметра горных пород, определенная в нижнем полупространстве;

$K(x - x_0, y - y_0, z - z_0)$  - ядро интеграла или функция, связывающая распределение физического параметра среды и наблюдаемое поле, или функция реакции среды на единичный импульс (поле от точечного источника);



$P$  - коэффициент пропорциональности, увязывающий размерность физического параметра и поля. Для гравитационного поля он равен гравитационной постоянной, для магнитного поля - единице. В дальнейшем этот коэффициент для простоты не указывается.



**Рис. 1.** Схема вычислений послойного решения прямой задачи путем свертки плотности с полем точечного источника.

Применим преобразование Фурье по осям  $X, Y$  и на основе теоремы о свертке получим:

$$\Phi(w_1, w_2, z_0 = \text{const}) = \int_{z=0}^{\infty} G(w_1, w_2, z) K(w_1, w_2, z - z_0) dz,$$

где  $w_1, w_2$  имеют смысл волновых чисел (пространственных или волночисловых частот) и именуемых ниже как частота.

Используя преобразование Ханкеля  $H_0\{ \}$ , можно убедиться, что двумерное преобразование ядра для гравитационного поля  $\Delta g$  имеет вид:

$$H_0 \left\{ \frac{z - z_0}{\left[ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}} \right\} = e^{-w(z - z_0)},$$

где  $w = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}$  - радиальная частота.

Используя теоремы о производной и первообразной, формулы, приведенные Страховым В.Н. для вычисления спектра сопряженных гармонических функций, а также формулы, приведенные Серкеревым С.А. для вычисления спектра косо намагниченных объектов и  $\Delta T$ , можно определить

спектр основных в геофизике ядер для статических полей в виде:

$$K(w_1, w_2, z - z_0) = M(w_1, w_2) e^{-w(z-z_0)},$$

где  $M(\omega_1, \omega_2)$  - в общем случае комплексная функция частоты, определяющая тип ядра. В работе приведена сводка видов функции для различных типов ядра [Приезжев И.И., 2005].

**В третьей главе** приводится описание разработанного программного обеспечения, входящего в систему моделирования плотностных и магнитных разрезов, описана методика построения плотностных разрезов при создании 3D моделей земной коры.

Программное обеспечение для формирования плотностных и магнитных моделей функционирует с индексно-последовательной, базой данных компьютерной технологии КОСКАД-ПРОФИЛЬ. Эта технология ориентирована на анализ и обработку профильных данных, с использованием как хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов, составляющих функциональное наполнение технологии КОСКАД 3D, так и новых оригинальных алгоритмов.

Исходной информацией для технологии КОСКАД-ПРОФИЛЬ является сеть наблюдений, которая соответствует площади исследований, ограниченной прямоугольными координатами  $X_{мин}$ ,  $X_{макс}$ ,  $Y_{мин}$ ,  $Y_{макс}$ , и содержит определенное число профилей. При этом каждый из профилей сети характеризуется количеством точек наблюдения, координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  каждой точки профиля и значениями набора исследуемых признаков. Если по какому-либо признаку сети на отдельных профилях информация отсутствует, то соответствующие поля в БД заполняются кодом отсутствия измерения. Кроме этого, все профили сети могут содержать несколько слоев, расположенных друг от друга на постоянном расстоянии  $dZ$  параллельно поверхности рельефа. Расстояние между соседними слоями  $dZ$ , как и количество слоев, является постоянным для всех профилей сети. Введение понятия слоя позволяет эффективно решать задачи трехмерного моделирования, при этом постоянство расстояния между отдельными слоями повышает эффективность решения большого числа задач, возникающих в процессе моделирования. В отдельно выбранной директории можно хранить 99 различных профильных сетей [Петров А.В., Юдин Д.Б., 2010].

В технологию гравитационного и магнитного моделирования входят:

- система построения гравитационных и магнитных моделей геологического разреза земной коры, включающая процедуры интерактивного создания и редактирования моделей, графическое представление результатов моделирования и оценки эффективности и согласованности модельных построений;
- программы интерактивной и автоматической классификации;
- программы решения прямых 3D задач грави- и магниторазведки.

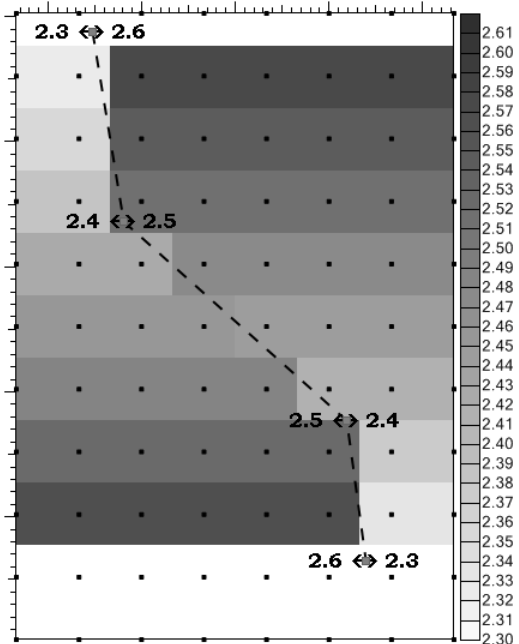
При моделировании плотностных и магнитных разрезов модель представляет собой совокупность точечных источников, организованную в двухмерную регулярную сеть. По горизонтальной оси откладываются координаты профиля, а по вертикальной (направленной вниз) глубины. Каждый узел сети наделяется физическими свойствами плотности или магнитной восприимчивости. Эти свойства далее будем называть массами (гравитационные массы или магнитные массы).

Основными возможностями системы являются:

- моделирование слоистых сред с изменением физических свойств по латерали, в том числе и моделирование разломов;
- моделирование блоковых сред и геологических тел;
- расчет прямых гравитационных и магнитных эффектов модели и сопоставление наблюдаемого поля с результатом решения прямой задачи;
- интерактивный процесс построения модели с широкими возможностями графического интерфейса пользователя.

Для формирования плотностного или магнитного разреза **слоистой среды** используется набор *полилиний*. *Полилиния* – это заданная в плоскости разреза ломаная линия, в каждом узле которой определены "массы слева" и "массы справа". Задание различных масс слева и справа дает возможность моделировать разрывные нарушения слоистых сред (разломы). Моделирование осуществляется следующим образом:

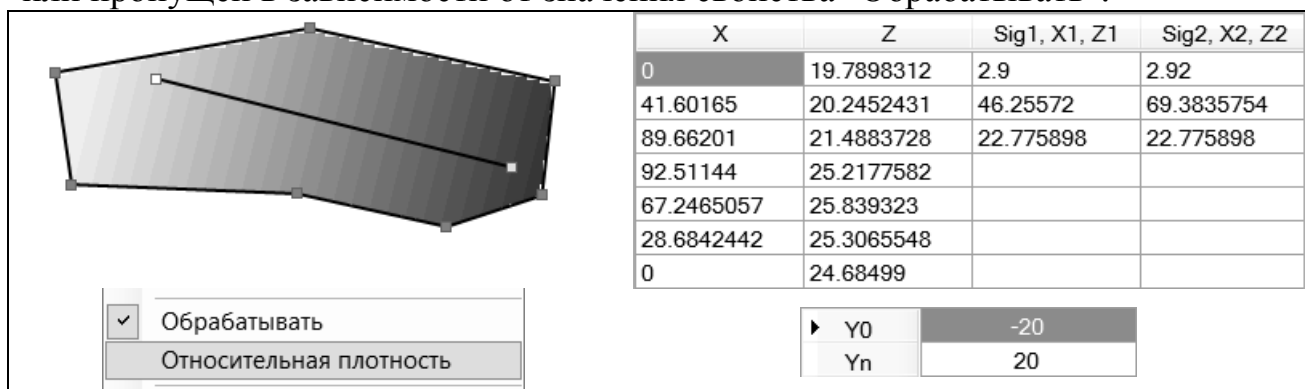
1. Узлы сети модели очищаются (заполняются кодом "пропуска измерения").
2. В плоскости разреза задается одна или несколько ломаных линий – *полилиний*, в узлах которых задаются магнитные или гравитационные "массы слева" и "массы справа" (эти массы могут и совпадать). Вдоль ломаной эти массы интерполируются при помощи линейной интерполяции.
3. Массы, каждой *полилинии*, переносятся в сеть модели, причем "массы слева" переносятся в узлы, лежащие слева от ломаной линии, а "массы справа" переносятся в узлы, лежащие справа.
4. Для каждого слоя модели  $Z_j = Z_0 + (j-1)dZ$ , при помощи линейной интерполяции, производится восполнение узлов, массы в которых не определены.



Для формирования плотностного или магнитного разреза **блоковой**

**среды** используется набор примыкающих друг к другу, горизонтально расположенных цилиндрических тел, сечениями которых являются многоугольники или *полигоны*. Простираение цилиндров перпендикулярно плоскости разреза. Для двумерных моделей простираение цилиндров не ограничено, а в 2½D случае простираение каждого из цилиндров ограничено плоскостями  $y=y^0$  и  $y=y^n$ . В пределах каждого тела задаются значения масс, которые могут быть постоянными или изменяться по линейному закону.

*Полигон* – это заданный в плоскости разреза многоугольник, который является основанием (сечением) цилиндрического тела. Для каждого *полигона* задаются местоположение и размер по оси  $Y - y^0$  и  $y^n$  и массы в двух точках. Масса каждого тела изменяется линейно относительно координатных осей плоскости разреза:  $M(x,z)=Ax+Bz+C$ . Константы  $A, B, C$  вычисляются автоматически в зависимости от расположения в плоскости разреза пары точек (на рис. 2 точки, соединенные отрезком) и соответствующих им масс, которые задаются в таблице свойств. Массы каждого *полигона* переносятся на сеть модели, заменяя массы слоистой модели, или суммируются с ними (если для *полигона* в контекстном меню установлено свойство "Относительная плотность"). Каждый полигон может быть включен в процесс моделирования или пропущен в зависимости от значения свойства "Обрабатывать".



**Рис. 2.** Моделирование геологических тел.

**Учет свойств вмещающей среды** дает возможность задавать объектам моделирования (*полигонам* и *полилиниям*) абсолютные (реальные) гравитационные и магнитные массы. Вместе с тем, если свойства вмещающей среды не заданы, то они считаются нулевыми. В этом случае объектам моделирования следует задавать избыточные (эффективные) массы. Свойства вмещающей среды определяются для каждого горизонтального слоя модели  $Z_j=const$  при помощи таблицы, состоящей из двух колонок. В первой задаются глубины, а во второй соответствующие им массы.

**Расчеты прямых задач** производятся со следующими основными параметрами:

- тип поля – гравитационное или магнитное;
- постановка задачи – двумерная или трехмерная;

- способ решения прямой задачи – в пространстве или в спектральной области;
- углы нормального магнитного склонения  $D$  и наклонения  $I$ ;
- высота пересчета прямой задачи.
- режим восполнения узлов модели с неопределенными физическими свойствами. Восполнение производится методом ближайшего соседа;
- коэффициенты линейного преобразования рассчитанного поля для увязки с наблюдаемым полем.

При вычислениях прямых задач грави- и магниторазведки осуществляется переход к эффективным (избыточным) массам путем послойного вычитания из масс модели масс вмещающей среды. Для полученной таким образом эквивалентной модели, производится расчет прямой задачи. Вычисления завершаются расчетом поля вмещающей среды и его суммированием с полем модели эффективной плотности. В конечном итоге реализуется вычисление поля модели, позволяющее оценить эффективность модельных построений.

**К дополнительным возможностям** системы относятся:

1. Построение графиков наблюдаемого и рассчитанного полей, и их разности.
2. Отображение в плоскости разреза подложки.
3. Настройка параметров визуализации сети и векторных объектов.
4. Масштабирование изображения, просмотр разреза с нарушением пропорций.
5. Отмена последних действий и повтор ранее отмененных.
6. Режим вывода эффективных плотностей модели.
7. Другие возможности (вывести сетку и узлы, выбрать масштаб графика разности и пр.).

**Программа решения прямых задач грави- и магниторазведки 3D с построением куба гравитационных и магнитных масс** предназначена для приведения профильной сети, содержащей модели плотностных и магнитных разрезов, к трехмерной регулярной сети, с дальнейшим вычислением прямого гравитационного или магнитного эффекта. Программа функционирует по следующей схеме:

- Производится запуск программы и задаются параметры вычислений: исходная сеть и обрабатываемый признак, тип поля и параметры для расчета прямой задачи, геометрические характеристики трехмерной регулярной сети и путь для ее сохранения.
- Запускается вычислительный процесс, состоящий в послойном приведении исходной сети к регулярной и вычислении прямого гравитационного или магнитного эффекта последней.
- В зависимости от выбранных параметров регулярная сеть может быть сохранена для дальнейшего использования в комплексе КОСКАД 3D.

- Завершаются вычисления интерполяцией результатов решения прямой задачи в точки исходной профильной сети и сохранением результата в заданную сеть.

Вычисление прямых задач грави- и магниторазведки производится методом И.И. Приезжева, основанном на сверточной модели в спектральной области. Приведение к регулярной сети производится на основе модификации метода kriging.

**Программа интерактивной классификации многопризнаковых данных IClass** входит в модуль "комплекс" компьютерной технологии КОСКАД 3D и предназначена для проведения классификаций в интерактивном режиме. Программа позволяет:

- Организовать рабочую область (проект), содержащую исходные, промежуточные и выходные данные.
- Проводить классификацию в интерактивном режиме.
- Осуществлять совместный просмотр исходных данных и результата классификации в виде наложенных друг на друга карт изолиний с широкими сервисными возможностями.

При работе с программой предлагается следующая схема действий:

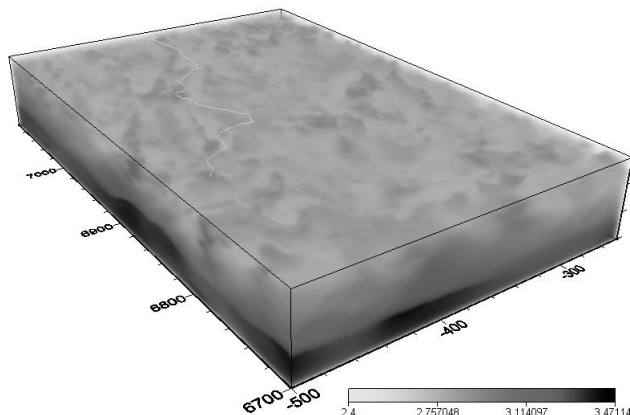
1. Определить исходные данные – признаковое пространство.
2. Задать начальное количество классов.
3. Разбить  $N$ -мерное признаковое пространство на непересекающиеся  $N$ -мерные полуинтервалы.
4. Задать соответствие между каждым классом и элементами разбиения признакового пространства.
5. Построить карту классификации.
6. При необходимости скорректировать количество классов, разбиение и соответствие между ними. Вернуться к предыдущему пункту.
7. Для точек, не вошедших ни в один класс, определить классовую принадлежность. Построить карту классификации.
8. При необходимости вернуться к п. 6.
9. Сохранить результат классификации.

**Программа интерактивной классификации в двумерном признаковом пространстве ParaClass** предназначена для интерактивной классификации в двумерном признаковом пространстве. Исходными данными для программы являются две двумерные регулярные сети, совпадающие геометрически. Главная форма приложения разделена на две части. В левой части формы находится двумерная гистограмма исходных данных, где пользователь задает множество полигонов. Каждому полигону ставится в соответствие номер класса и проводится классификация. Карта классификации отображается в правой части формы.

**Методика построения плотностных разрезов** при создании 3D моделей земной коры предполагает следующие этапы:

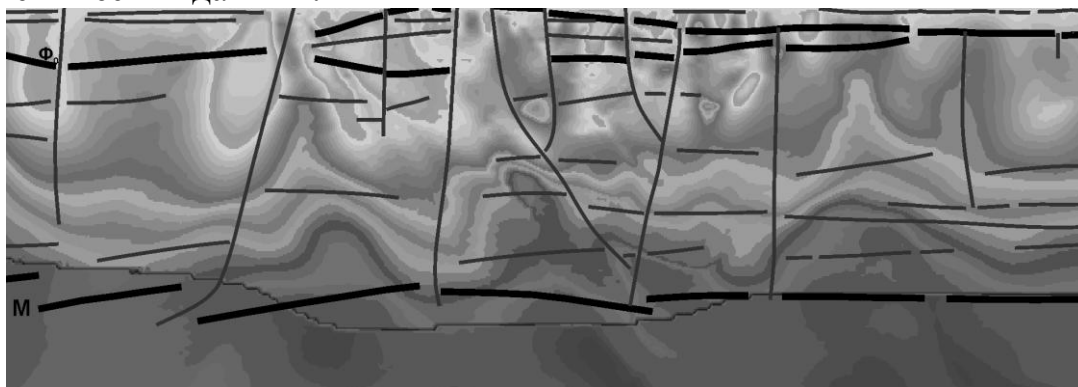
1. Этапы моделирования, реализуемые в программном комплексе спектрально-корреляционного анализа КОСКАД 3D [Мильштейн Е.Д., 2007]:

- Получение трехмерной модели относительного распределения плотностей методом Андреева.
- Корректировка глубин источников, уточнение шкалы глубин.
- Нормирование, переход к модели эффективной плотности.
- Получение плотностной модели путем преобразования, обеспечивающего градиентно-слоистое нарастание плотности.



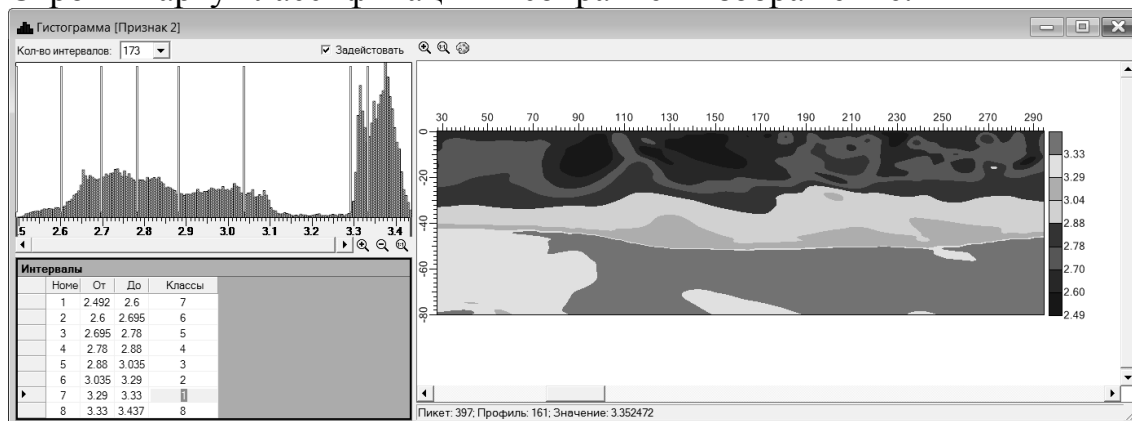
2. Подготовка данных для программы моделирования комплекса КОСКАД-ПРОФИЛЬ.

- **Подготовка подложки.** Подложка – это изображение, содержащее информацию, необходимую в процессе моделирования. Например, это может быть разрез вдоль некоторого профиля плотностной модели, полученной на предыдущем этапе. На разрез может быть наложена различная информация, например, о вертикальных и горизонтальных границах блоковых структур, полученная в результате интерпретации сейсмических данных.



- **Векторизация плотностного разреза.** Векторизация – это преобразование растровых изображений в элементы векторной графики (точки, линии, полигоны, надписи и др.). Плотностной разрез и другая априорная информация позволяет интерпретатору синтезировать геометрию модели, разбить разрез на слои и блоки. Эти действия могут быть выполнены в программе моделирования вручную. Далее рассмотрим интерактивный, полуавтоматический способ геометризации модели:
  - В системе КОСКАД 3D из плотностного куба получаем разрез вдоль профиля.

- Выполняем кластеризацию полученного разреза. Для этого можно использовать программы классификации модуля "КОМПЛЕКС" системы КОСКАД 3D – метод динамических сгущений, классификация по Петрову А.В. и интерактивная классификация. Строим карту классификации и сохраняем изображение.



- Векторизуем полученное изображение. Для этого можно воспользоваться утилитой PowerTRACE графического приложения CorelDRAW. В результате получим набор полигонов.
- Выполняем проецирование полигонов в координаты разреза и сохранение векторной информации в формате, пригодном для системы моделирования. Для этого можно воспользоваться специальной макро-процедурой, разработанной автором для графического приложения CorelDRAW или приложением Golden Software Surfer.

### 3. Основные этапы, выполняемые в предложенной системе моделирования.

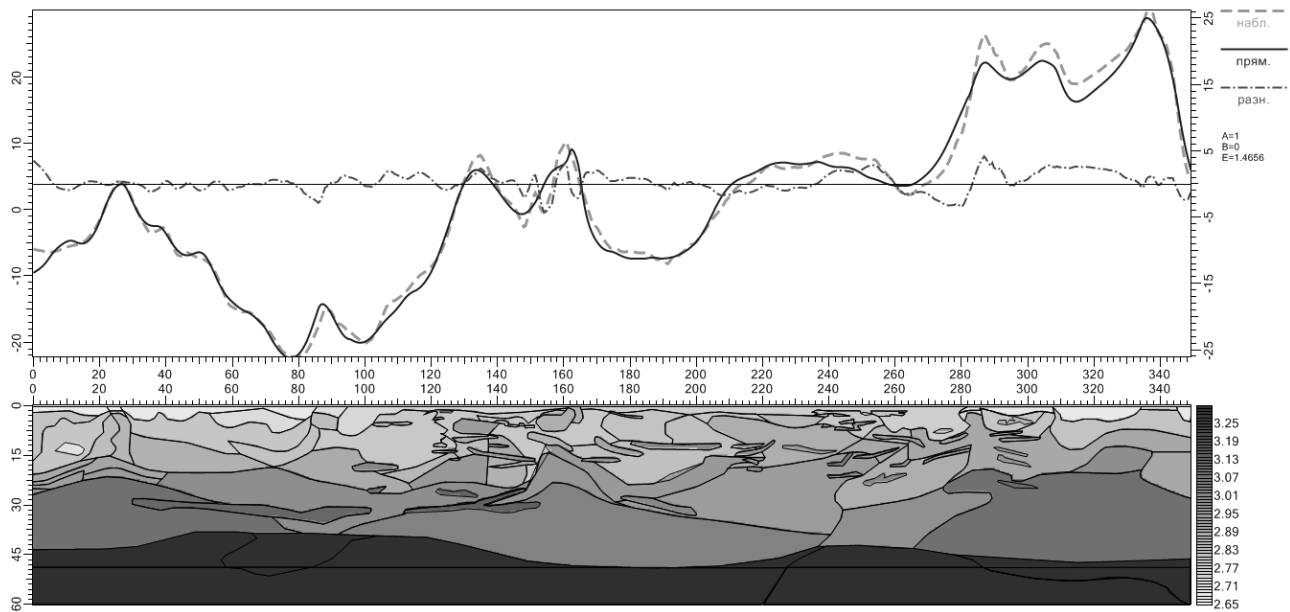
- Подготовка таблицы для учета свойств вмещающей среды.
- Подбор геометрических и физических характеристик профильных моделей.
- Построение трехмерной модели на основе послойной интерполяции с использованием методов геостатистики.

**В четвертой главе** представлены примеры практического использования предлагаемой технологии моделирования. На рис. 3 представлена модель плотностного разреза по фрагменту опорного регионального профиля 1-ЕВ (ПК 850-1200).

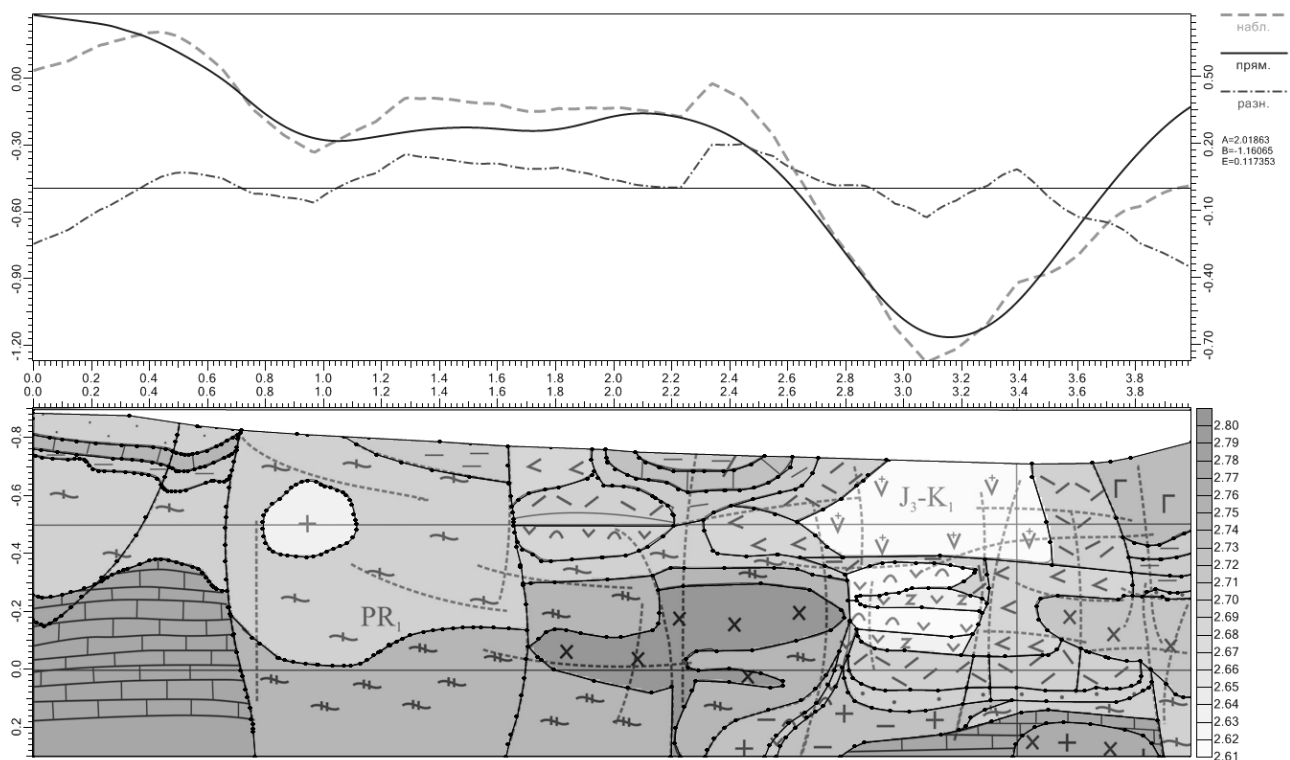
На рис. 4 представлена модель плотностного разреза в осадочном чехле, построенная на основе *геологического разреза* (показанного в нижней части рисунка), полученного при проведении геологических изысканий на уран в пределах Урюмкано-Уровского района Забайкалья.

На этих рисунках в верхней части изображено гравитационное поле вдоль линии разреза (сплошная линия), результаты решения прямой задачи (пунктирная линия) от модели, разность между наблюдаемым полем и расчетным по модели (пунктир через точку).





**Рис. 3.** Онежский участок регионального опорного профиля 1ЕВ (ПК 850-1200).



**Рис. 4.** Пример построения плотностной модели по геологическому разрезу.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Проведенные исследования по разработке компьютерной технологии гравимагнитного моделирования, ее тестирование и использование в процессе модельных построений вдоль региональных профилей при изучении глубинного строения земной коры, кристаллического фундамента и осадочного чехла позволили определить основные направления ее дальнейшего развития:

- создание программно-алгоритмических решений и математического аппарата для оценки адекватности и увязки модельных построений по данным гравиразведки и магниторазведки;
- дальнейшее совершенствование технологии создания магнитных моделей, учитывающей весь спектр свойств объектов, индуцирующих магнитное поле;
- включение в процесс моделирования результатов интерпретации данных сейсморазведки и имеющуюся скважинную информацию.

### **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Решение обратной линейной задачи гравиразведки на основе метода регуляризации для системы многоугольников. Соавторы Филатов В.Г., Гласко Ю.В., Овсепян М.Л., Сташевский В.Е. Геофизика №5, 2005, с. 58.
2. Адаптивные приемы выделения неоднородных геологических объектов в геофизических полях. Соавторы Никитин А.А., Петров А.В. Изв. ВУЗов. Геология и разведка №3, 2006г. с. 50 – 56.
3. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД-3Д. Соавторы Никитин А.А., Петров А.В. Изв. ВУЗов. Геология и разведка №6, 2007г.
4. Применение регуляризации и оптимальной фильтрации геофизических данных при поисках месторождений углеводородов (Глава 2). Соавторы Никитин А.А., Петров А.В., Мегеря В.М., Филатов В.Г., Лобанов А.М. – Учебное пособие для ВУЗов, М.: Изд. РГГРУ, 2011, с. 29-78.
5. Оптимальная фильтрация и интропродолжение геополей с учетом вторичного магнитоминералообразования в нефтегазоразведке (Главы 3,4). Соавторы Никитин А.А., Петров А.В., Мегеря В.М., Старостенко В.И., Филатов В.Г., Лобанов А.М. – Учебное пособие для ВУЗов, М.: Изд. РГГРУ, 2011, с. 48-98.
6. Интропродолжение и эпигенетическое магнитоминералообразование в нефтегазоразведке. Соавторы Лобанов А.М., Филатов В.Г., Петров А.В. – Учебное пособие для ВУЗов, М.: Изд. РГГРУ, 2009, 79с.
7. Компьютерная система геолого-математического моделирования рудных тел. Соавторы Сикорский В.А. – VI Международная конференция "Новые идеи в науках о Земле", Москва, РГГРУ, 2003, том 4, с. 229.
8. Возможности компьютерной технологии "Коскад 3Dt" при обработке и интерпретации данных глубинной сейсморазведки. Соавторы Петров А.В., Пискун П.В. – Тезисы докладов на V международной конференции "Крым 2003", Крым, Гурзуф, 8-13 сентября 2003г., с. 285.
9. Решение обратных задач гравимагниторазведки на основе методов регуляризации, оптимальной фильтрации и полного нормированного градиента при поисках месторождений нефти и газа. Соавторы Филатов

- В.Г., Овсепян М.Л., Булычев Е.В., Александров Г.В., Пискун П.В. – Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 31-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва, 26-29 января 2004г. – М.: ОИФЗ РАН, 2004. – 86 с.
10. Компьютерная технология "КОСКАД СЕЙС" комплексного анализа сейсмической и скважинной информации. Соавторы Петров А.В., Пискун П.В. – Тезисы докладов VII-ой международной научно-практической конференции Геомодель-2005 г. Геленжик, 11-17 сентября 2005г. 144 с.
  11. Возможности моделирования по гравимагнитным и сейсмическим данным в компьютерной технологии «КОСКАД 3D». – Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Екатеринбург, 30 января - 3 февраля 2006г. – Екатеринбург.: Институт геофизики УрО РАН, 2006. – 467 с.
  12. Комплекс регуляризованных алгоритмов разделения потенциальных полей и решения обратных задач гравимагниторазведки при поисках нефтегазовых месторождений. Соавторы Филатов В.Г. и др. VII Международная конференция Новые идеи в науках о Земле, Москва, РГГРУ, 2005, с. 26.
  13. Развитие компьютерной системы КОСКАД-3Д. Соавтор Петров А.В. – Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва, 29 января – 3 февраля 2007г. – М.: ОИФЗ РАН, 2007. – 301 с.
  14. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии КОСКАД-3Д. Соавтор Петров А.В. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 35-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, г. Ухта УГТУ, 2008г. – с. 241-242.
  15. Компьютерная технология построения гравимагнитных моделей. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Москва, 25 января – 29 января 2010 г., с. 149.
  16. Возможности моделирования гравимагнитных полей в компьютерной системе КОСКАД-ПРОФИЛЬ. – X Международная конференция Новые идеи в науках о Земле, Москва, РГГРУ, 2011, Том 2, с. 25.

Подпись автора \_\_\_\_\_ / С.В. Зиновкин /