НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ им. С.И.СУББОТИНА

На правах рукописи

ЖУРАВЛЕВА ОЛЬГА ИГОРЕВНА

УДК 550.831

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ СТРУКТУРНОЙ ГРАВИМЕТРИИ НА ОСНОВЕ РАВНОМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Специальность 01.04.12 - Геофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев - 1996

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Ивано-Франковском государственном техническом университете нефти и газа.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор физико-математических наук, профессор КОБРУНОВ А.И.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: 1. Доктор физико-математических наук, профессор БУЛАХ Е.Г.

2. Кандидат физико-математических наук, ЯКИМЧУК Н.А.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Государственная горная академия Украины (г.Днепропетровск)

Защита диссертации состоится "18" февраля 1997 г. в "14⁰⁰" часов на заседании специализированного совета Д 01.95.01 при Институте геофизики им. С.И.Субботина по адресу: 252680 г.Киев-142, пр.Палладина, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины.

Автореферат разослан "3" января 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор физико-математических наук В.С.Гейко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время все более актуальной проблемой, стоящей перед геофизическими методами разведки, является детальное изучение разрезов сложнопостроенных сред. В этом случае используются многопараметрические модели, определение всех характеристик которых находится на грани или даже за пределами интерпретационных возможностей отдельного геофизического метода. Резко увеличивается неединственность решения соответствующих обратных задач. В связи с этим важное значение приобретает разработка методов интерпретации геофизических полей, учитывающих весь комплекс имеющихся геолого-геофизических данных об объекте.

Характерно это и для гравиметрии, сохраняющей свою значительную роль в комплексе геологоразведочных работ, как благодаря ее экономичности и возможности получения плотностных характеристик среды, так и наличию развитого аппарата интерпретации. При этом основной задачей становится построение не собственно гравиметрической модели, а модели, непротиворечащей всему комплексу априорной информации. В частности, весьма актуальной является разработка методов и методики интерпретации данных структурной гравиметрии, поскольку модели слоистых сред широко используются при изучении строения осадочного чехла, земной коры и мантии и дают возможность аппроксимировать широкий класс геологических объектов.

Таким образом, проблема поиска решения обратной задачи структурной гравиметрии, максимально согласованного с уже имеющимися дополнительными данными, и разработка эффективных алгоритмов и программ для ее решения является актуальной проблемой и имеет важное практическое значение.

Ц е л ь ю р а б о т ы является повышение интерпретационных возможностей гравиметрии при исследовании сложнопостроенных сред за счет развития методов решения обратных задач гравиметрии структурного типа, основанных на использовании равномерной оптимизации решения с критериями сверточного типа, что обеспечивает всесторонний учет априорной информации, а также построения эффективных, устойчивых алгоритмов и вычислительных схем решения указанных задач, исследования особенностей получаемых решений и методических приемов их применения.

При этом в диссертации решаются следующие задачи.

1. Получение спектральных представлений для явного вида решения нелинейной обратной задачи стуктурной гравиметрии на основе использования равномерной оптимизации и критериев сверточного типа для произвольного количества границ с постоянной и переменной по латерали плотностью пластов.

2. Получение выражений для общего вида решения прямой задачи в спектральной форме для произвольного количества границ, исследование особенностей решения прямой задачи в спектральной области и выработка методических приемов, направленных на получение решения с заданной точностью.

3. Разработка устойчивых алгоритмов решения обратной задачи структурной гравиметрии, оптимальных в метрике C с критерием сверточного типа, доказательство регуляризующих свойств и устойчивости полученных алгоритмов, сходимости итерационного процесса к искомому решению.

4. Построение вычислительной схемы указанной обратной задачи и ее программная реализация.

5. Исследование свойств полученных решений в зависимости от выбора параметров минимизируемого функционала и по-

грешностей задания исходных данных на модельных и практических примерах и выработка методики формирования и использования равномерных критериев оптимальности.

Научная новизна. В диссертации впервые:

- получены явные выражения для спектрального представления оператора решения обратной задачи структурной гравиметрии при нелинейной постановке, оптимального в метрике С с критерием сверточного типа, в двумерном и трехмерном вариантах для произвольного количества пластов с постоянной и переменной по латерали плотностью;
- на основе полученных выражений разработан и реализован алгоритм получения решения обратной нелинейной задачи структурной гравиметрии, оптимального в метрике С;
- разработан и реализован алгоритм решения прямой задачи структурной гравиметрии, основанный на использовании спектральных преобразований, для произвольного количества границ, переменной и постоянной плотности пластов, исследованы методические особенности этого алгоритма;
- разработана и эмпирически обоснована на модельных и практических примерах методика формирования и использования равномерных критериев оптимальности сверточного типа.

Практическая ценность работы определяется тем, что в результате проведенных в диссертации исследований разработан и реализован в виде пакета программ метод решения обратных задач структурной гравиметрии, оптимальных в метрике С, и методика формирования и использования критериев сверточного типа. Созданный программный комплекс дополняет разработанную Ивано-Франковским государственным техническим университетом нефти и газа АСИГМ "Карпаты".

Результаты испытаний программ на тестовом и полевом материале показывают их высокую геологическую и экономическую эффективность и пригодность к использованию в различных геологических условиях как для детальной обработки результатов, так и для экспресс-анализа и проверки геологических гипотез.

Апробация работы. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались на VI Всесоюзной школе-семинаре "Теория и практика интерпретации потенциальных полей" (г.Ялта, 1989 г.), Всесоюзных семинарах им. Д.Г.Успенского "Теория и практика геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий" (г.Алма-Ата, 1990 г., г.Днепропетровск, 1991 г.), республиканской школе передового опыта "Пути повышения эффективности гравиразведочных работ для решения различных геологических задач" (г.Днепропетровск, 1987г.), научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Ивано-Франковского государственного технического университета нефти и газа (1995, 1996гг.), а также на научных семинарах кафедры ГИС названного университета.

Публикации. Основные положения диссертации излагаются в 7 печатных работах.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 137 страниц машинописного текста, 2 таблицы, 27 рисунков и список литературы из 157 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору А.И.Кобрунову за постановку задачи, оказание помощи при теоретических исследованиях, поддержку и внимание на всех этапах работы. Автор благодарит также всех сотрудников кафедры ГИС и особенно к.ф.-м.н. Денисюка Р.П., к.ф.-м.н. Петровского А.П. и Суятинова В.Н. за содействие при выполнении работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обсуждаются основные проблемы, возникающие при решении обратных задач гравиметрии и, в частности, задач структурного типа, показаны преимущества предложенного А.И.Кобруновым критериального подхода к решению обратных задач геофизики, кратко излагается его суть.

Структурная обратная задача гравиметрии впервые сформулированая Б.В.Нумеровым еще в 30-х годах в дальнейшем получила свое развитие в трудах А.К.Маловичко, В.Н.Страхова, В.И.Старостенко, Е.Г.Булаха, Л.Т.Бережной, М.А.Телепина, Е.А. Мудрецовой, В.Г.Филатова, В.Б.Гласко, С.М.Оганесяна, А.В.Цирульского, А.В.Черного, Ю.В.Антонова, Г.И.Каратаева, М.С.Жданова и многих др. В.Н.Страхов (1974 г.) показал, что данная задача обладает существенной эквивалентностью и для ее решения необходимо привлечение значительного объема дополнительной информации. Особенно важную роль приобретают проблемы, связанные с неоднозначностью получаемых решений, в условиях сложнопостроенных сред, где используются многопараметрические модели. В этом случае жесткие требования, выдвигаемые при доказательстве теорем единственности, зачастую трудновыполнимы. Целесообразнее на этапе постановки задачи обеспечить выделение классов единственности, отвечающих заданной априорной информации и вводимым условиям оптимальности, а в дальнейшем получать решение из этих классов, соответствующее конкретному гравитационному полю. Такой подход был развит А.И.Кобруновым и назван им критериальным.

Суть его заключается в следующем. Из множества решений, удовлетворяющих наблюденное поле, выбирается то, которое минимизирует определенным образом сформированный функционал качества решения J. Этот функционал, называемый критерием оптимальности, содержит в свернутом виде априорную информацию о параметрах среды. Он позволяет доопределить задачу и из множества эквивилентных решений выделить класс единственности. Форма связи решения с априорными сведениями об объекте определяется выбором вида критерия оптимальности. Функционал J относится к параметрам среды, а не к качеству подбора поля. Последнее достигается на этапе построения устойчивых вычислительных схем.

Близкими по идее к критериальному подходу являются двойственный метод С.М.Оганесяна, В.И.Старостенко и метод локальных поправок в его трехмерном варианте И.Л.Пруткина. Однако поиск решения в этих методах осуществляется для одной контактной поверхности, а возникающая при этом проблема разделения гравитационных полей соизмерима по трудности с собственно решением обратной задачи.

В настоящее время в рамках критериального подхода развита целая группа методов решения обратных задач гравиметрии, в том числе и структурного типа, отличающихся принципами выбора оптимального решения, и, как следствие, технологичностью и эффективностью в различных геологичнских условиях. В работах А.И.Кобрунова, Р.П.Денисюка были разработаны методы решения нелинейных обратных задач оптимальных в метрике L_2. Однако, если ошибки в задании модели начального приближения не подчиняются нормальному закону распределения (например, носят систематический характер), более правомерно использование оптимизации в равномерной метрике C.

А.И.Кобруновым рассмотрены вопросы существования решений этой экстремальной задачи, ее единственности и собственно характеризации решения. Для структурных задач в нелинейной постановке при построении равномерных критериев использовались операторы умножения на весовую функцию (Кобрунов А.И., Войнова О.В.,Суятинов В.Н.). Опыт решения обратных задач в классе распределений плотности (А.И.Кобрунов, В.А.Варфоломеев, С.Г.Аникеев) показал высокую содержательную эффективность применения в аналогичных условиях операторов типа свертки. Введение такого рода критериев оптимальности ассоциируется, при определенных условиях, с корреляционной связью между искомым решением и заданными элементами разреза (как правило, начальным приближением) и обеспечивают более полный учет априорных данных. Однако нелинейность структурной задачи затрудняла использование аппарата преобразований Фурье в этом случае аналогично линейным задачам. Данная работа посвящена дальнейшему развитию этого вопроса и разработке методики формирования и использования равномерных критериев оптимальности сверточного типа.

Во второй главе приводится математическая постановка задачи, рассматривается конструкция равномерных критериев оптимальности сверточного типа, получены выражения для спектрального представления явного вида решения данной задачи.

Пусть в прямоугольной системе координат XYZ (ось Z направленна вниз к массам) в нижнем полупространстве имеется N пластов, ограниченных поверхностями $z=f_i(x,y), i=0 \div N$, являющимися однозначными непрерывными функциями координат. Плотность i-го пласта в общем случае известная функция горизонтальных координат $\sigma_i=\sigma_i(x,y), i=1 \div N$. Связь между вертикальной производной гравитационного потенциала $U_z(x_0,y_0)$, заданной на горизонтальной плоскости z=0 (обозначим ее E_0), и уравнениями искомых N+1 границ определяется соотношением:

$$U_z(x_0,y_0)/\gamma = \sum_{i=0}^{N} \iint\limits_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta\sigma_i(x,y)\,dx\,dy}{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+f_i^2(x,y)]^{1/2}}, \qquad (1)$$

где γ- гравитационная постоянная, $\Delta\sigma_i(x,y)=\sigma_{i+1}(x,y)-\sigma_i(x,y)$, $\sigma_0=\sigma_{N+1}=0$. Для выбора единственного решения (1) из множества возможных, введем условие:

$$J_0(f(x,y))=||F\Delta\sigma t||_{C^{N+1}}=\sup_{x,y,i}|F_i\Delta\sigma_i(x,y)[f_i(x,y)-f_i^*(x,y)]|\to\min \qquad (2)$$

Здесь $f_i^*(x,y)$, $i=0\div N$ - нулевое приближение к $f_i(x,y)$, $F=\{F_0, F_1,\dots,F_N\}$ - линейные замкнутые операторы из $C(E_0)$ в $C(E_0)$, $t_i(x,y)=f_i(x,y)-f_i^*(x,y)$ - уклонение подобранной модели от исходной. В общем случае в качестве F_i могут использоваться операторы умножения на весовую функцию, свертки или их комбинация.

А.И.Кобруновым было показано, что решение задачи (1-2) может быть найдено на классе функций с представлением

$$f_i(x,y)=f_i^*(x,y)+\Delta\sigma_i^{-1}(x,y)F_i^{-1}\varphi(x_0,y_0), \qquad (3)$$

если выполняются необходимые условия минимума функционала. Здесь F_i^{-1}- обратный к F_i оператор, φ - некоторая функция параметризующая систему границ. Выражение (3) описывает класс единственности для решений, оптимальных в равномерной метрике, и позволяет на его основе получать выражения для конкретных алгоритмов.

Как следует из (3), нас интересует не сам оператор F_i, а F_i^{-1}. Если F_i оператор свертки некоторой функции $E_i(x,y)$ с искомой величиной $\Delta\sigma_i t_i$, то требование минимума выражения (2) интуитивно связывается с требованием корреляционной связи между $\Delta\sigma_i t_i$ и функциями K_i, которые в смысле алгебры свертки обратные к E_i. Наличие корреляционной связи между решением, порождаемым критерием (2), и функциями K_i подтверждается далее экспериментально. Очевидно, что выбор функций K_i оказывает сильное влияние на характер решения. Поскольку мы ищем элементы разреза, корреляционно связанные с этой функцией, то в зависимости от ее вида можем получать эквивалентные распределения, удовлетворяющие различным гипотезам о геологическом строении изучаемого участка. С этой целью в K_i вводится информация о геометрическом строении той модели, свойства которой мы хотели бы отобразить в решении. Как правило, это модель начального приближения, поскольку при ее построении используется вся имеющаяся в данный момент априорная информация. Дополнительное введение в K_i информации о достоверности построения границ на разных участках с помощью условных весовых коэффициентов τ_i позволяет учитывать неравноточность их построения в процессе решения.

Для сужения области эквивалентности решения можно вводить дополнительные ограничения на искомое решение (например, в виде ограничений типа неравенств на возможную глубину залегания границы), если они есть. Учет этой компоненты совокупного критерия осуществляется алгоритмически на каждом шаге итерационного процесса.

На основе (3), используя спектральные представления, получено выражение для явного вида решения задачи (1-2). Пусть $f_i^*(x,y)=z_i$, $i=0 \div N$, F_i^{-1} есть оператор свертки с функцией K_i, тогда с учетом (3): $h_i(x,y) = \Delta\sigma^{-1}(x,y)F_i^{-1}\varphi(x_o,y_o) = \Delta\sigma^{-1}(x,y)(K_i*\varphi)$, где $*$ - операция свертки с функцией $K_i(x,y)$. Используя разложение подынтегрального выражения в (1) в ряд Тейлора по степеням $h_i(x,y)=f_i(x,y)-z_i$ (то есть h_i - превышения i-ой границы над некоторым заданным уровнем z_i) в окрестности $z=(z_o,z_1,\dots,z_N)$ и выполнив переход в спектральную область, получим для постоянной плотности пластов:

$$h_i(x,y)=\Big[\Delta\sigma_i^{-1}\,K_i(\omega,\nu)\circ\Big\{\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma}-2\pi\sum_{i=0}^{N}\Delta\sigma_i\,e^{-|W|Z_i}\sum_{k=2}^{\infty}\frac{(-|W|)^{k-1}}{k!}\circ$$
$$\circ(h_i^k(x,y))^{\wedge}\Big\}\Big/\sum_{i=0}^{N}2\pi\,K_i(\omega,\nu)\,e^{-|W|Z_i}\Big]^{\sim}, \tag{4}$$

для переменной по латерали плотности $\Delta\sigma_i=\Delta\sigma_i(x,y)$:

$$h_i(x,y)=\Big[K_i(\omega,\nu)\circ\Big\{\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma}-2\pi\sum_{i=0}^{N}e^{-|W|Z_i}\sum_{k=2}^{\infty}\frac{(-|W|)^{k-1}}{k!}\circ \tag{5}$$
$$\circ[\Delta\sigma_i(x,y)h_i^k(x,y)]^{\wedge}\Big\}\Big/\sum_{i=0}^{N}2\pi K_i(\omega,\nu)e^{-|W|Z_i}\Big]^{\sim}\Big/\Delta\sigma_i(x,y).$$

Здесь "^", "~" - операции прямого и обратного преобразования Фурье соответственно, k - число членов ряда; $|W|=(\omega^2+\nu^2)^{1/2}$; $K_i(\omega,\nu)$, $\Delta U_z(\omega,\nu)$ - спектры функций $K_i(x,y)$, $\Delta U_z(x_0,y_0)$, а

$$\frac{\Delta U_z(x_0,y_0)}{\gamma}=\sum_{i=0}^{N}\iint\limits_{-\infty}^{+\infty}\frac{\Delta\sigma_i\,dx\,dy}{[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+Z_i^2]^{1/2}}-U_z(x_0,y_0)/\gamma. \tag{6}$$

Подчеркнем, что в выражениях (4), (5) нелинейность задачи учитывается вторым слагаемым в фигурных скобках. Выбирая k, мы фиксируем порядок нелинейных членов, которые должны быть учтены. Аналогичные результаты получены и для двумерного варианта задачи. Выражения (4),(5) для явного вида решения обратной задачи структурной гравиметрии в нелинейной постановке являются по существу уравнениями соответствующих классов единственности.

<u>Третья глава</u> посвящена разработке метода решения прямой задачи гравиметрии для слоистой модели среды на основе использования спектральных представлений. Об эффективности спектральных преобразований в целях повышения быстродействия алгоритмов писали, например, Гладкий К.В., Серкеров С.А., Страхов В.Н., Старостенко В.И., Бережная Л.Т., Телепин М.А., Мелихов В.Р., Bhattacharyya B.K., Parker R.L. и др. Основными препятствиями на пути развития этих методов явля-

ются их слабая методическая изученность, проблемы, возникающие при переходе к дискретным спектрам, и необходимость повышения точности рассчетов.

При разработке автоматизированной системы решения обратных задач ее эффективность возрастает, если однотипно решается сопутствующая прямая задача. В связи с этим по схеме, аналогичной принятой для получения решения обратной задачи, были получены выражения для расчета аномального гравитационного эффекта от среды, представленной N слоями. Для трехмерной модели оператор прямой задачи в спектральном представлении имеет вид для однородных пластов:

$$\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma} = 2\pi \sum_{i=0}^{N} \Delta\sigma_i \; e^{-|W|z_i} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-|W|)^{k-1}}{k!} \; (h_i^k(x,y))^{\wedge} , \quad (7)$$

для пластов с плотностью изменяющейся по латерали:

$$\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma} = 2\pi \sum_{i=0}^{N} e^{-|W|z_i} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-|W|)^{k-1}}{k!} \; [h_i^k(x,y)\; \Delta\sigma_i(x,y)]^{\wedge} . \quad (8)$$

Для перехода в пространственную область применяется обратное преобразование Фурье. Аналогичные выражения получены и для двумерного случая.

Эти выражения являются в определенном смысле обобщением на случай многих границ известной формулы, полученной Р.Паркером (Parker R.L), а в отечественной литературе, но в более узкой постановке, Л.Т.Бережной и М.А.Телепиным. Автору данной работы, наряду с расширением сферы применения указанных формул на случай многих границ, принадлежит детальная разработка вопросов, связанных с методикой их использования.

Полученные выражения имеют вид сходящегося ряда преобразований Фурье. Исследуемый ряд сходится, если точки вычислений находятся выше аномальных масс. Скорость сходимости ряда повышается с увеличением глубины залегания границы и выше для границ с более пологим рельефом.

Члены разложения полученного ряда, начиная со второго, позволяют учитывать нелинейность задачи. Фиксируя количество членов ряда k, мы определяем порядок нелинейных членов, которые должны быть учтены. Число k выбирается эмпирически, в зависимости от формы плотностных границ и необходимой точности, или автоматически в процессе решения задачи. Отметим, что основной вклад вносят первые два-три члена ряда, с ростом k в изменении поля играют роль все более высокочастотные компоненты спектра, давая все меньшее изменение аномалии.

Однако последнее справедливо при правильном учете особенностей, обусловленных дискретностью и конечностью реальных данных, и, как следствие, осложняющих эффектов, основными из которых являются недостаточная частотная разрешенность спектров, их периодичность, циклический характер спектра, получаемого с помощью БПФ, проявления эффекта Гибса. Для борьбы с этими помехами используются следующие приемы:

- нормирование исходных данных по $\Delta x, \Delta y$ (шаг точек по x и y) и последующее денормирование полученных результатов, согласующее размерность входных данных по осям x, y, z и уменьшающее зависимость результата от шага дискретизации в пределах действия теоремы Котельникова;
- использование свойств симметрии спектров действительных функций, позволяющее отбрасывать значения спектра, искаженные за счет цикличности БПФ, и повышающее экономичность расчетов;
- дополнение последовательности значений спектра конечной длины нулевыми отсчетами; последнее улучшает частотную разрешенность в спектральной области и представляется как "раздвижение" фиктивных масс, возникающих за пределами исследуе-

мого участка за счет периодичности дискретных спектров в пространственной области.

На двумерных примерах иллюстрируются влияние выбора количества членов ряда k в разложении спектра аномалии, шага дискретизации Δx и длины профиля расчетов L на точность вычислений. Как показывают эксперименты, ошибки, возникающие за счет недостаточного шага Δx, располагаются на локальных участках профиля над точками перегиба границы или субвертикальными контактами и не вносят большой погрешности (менее 1-2%) в расчеты, если каждый отрезок границы закреплен хотя бы двумя-тремя точками. С увеличением глубины залегания границы ошибки за счет выбора шага Δx уменьшаются.

Более сложно бороться с погрешностями, обусловленными влиянием фиктивных масс, возникающих за счет периодичности дискретных спектров. Эта погрешность представляет собой низкочастотную помеху с минимумом в центре участка, влияющую на уровень аномалии. Для ослабления ее воздействия изучаемый участок дополняется с каждой стороны закраинными зонами, размер которых зависит от необходимой точности решения.

<u>В четвертой главе</u> освещаются вопросы связанные с построением и реализацией устойчивого алгоритма и конкретной вычислительной схемы решения рассматриваемой обратной задачи, а также формированием сверточных функций K_i.

Полученные выражения (4), (5) для явного вида решения обратной задачи структурной гравиметрии имеют вид неограниченных операторов. Эти соотношения относятся к распространенному классу задач, основанных на использовании интегральных уравнений Фредгольма первого рода типа свертки. Такие задачи, как известно, являются некорректно поставленными и характеризуются значительной неустойчивостью решения. Общие методы регуляризации для такого рода уравнений развиты в работах А.Н.Тихонова, М.М.Лаврентьева, В.К.Иванова, В.Н. Страхова, В.И.Старостэнко, В.Б.Гласко, О.К.Литвиненко, В.Р.Мелихова, В.М.Березкина, Е.А.Мудрецовой, В.Г.Филатова и др. В данной работе приводится одна из возможных схем решения.

На основе опыта решения линейных задач с равномерными критериями оптимальности выбирается вид стабилизирующего функционала $M(\omega,\nu,\alpha)=\alpha(|W|^2+1)$ (где $|W|=(\omega^2+\nu^2)^{1/2}$), который ассоциируется с введением в решение требования минимизации критерия, характеризующего степень "изрезанности" решения. Таким образом, в решении задачи участвуют два уровня критериев: критерий качества решения (2), обеспечивающий его единственность, и критерий, влияющий на устойчивость решения. Для устранения неустойчивости и построения численных алгоритмов окончательно используется соотношение:

$$h_i(x,y)\,\Delta\sigma_i = \left[\frac{K_i(\omega,\nu)\,U_z(\omega,\nu)}{2\pi\sum\limits_{i=0}^{N}K_i(\omega,\nu)e^{-|W|z_i}+\alpha(|W|^2+1)}\right]^{\sim}_{\omega,\nu}, \tag{9}$$

где α - параметр регуляризации,

$$U_z(\omega,\nu)=\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma}-2\pi\sum_{i=0}^{N}\Delta\sigma_i e^{-|W|z_i}\sum_{k=2}^{\infty}\frac{(-|W|)^{k-1}}{k!}(h_i^k(x,y))^\wedge$$

для модели с постоянной плотностью пластов;

$$U_z(\omega,\nu)=\frac{\Delta U_z(\omega,\nu)}{\gamma}-2\pi\sum_{i=0}^{N}e^{-|W|z_i}\sum_{k=2}^{\infty}\frac{(-|W|)^{k-1}}{k!}[\Delta\sigma_i(x,y)h_i^k(x,y)]^\wedge;$$

для переменной плотности; $\Delta U_z(\omega,\nu)$ - спектр функции $\Delta U_z(x,y)$ (формула (6)). Обозначим $U_0(\omega,\nu)=\sum\limits_{i=0}^{N}2\pi K_i(\omega,\nu)e^{-|W|z_i}$, Ω - область отличных от нуля коэффициентов Фурье функций $U_z(x_0,y_0)$, $U_0(x_0,y_0)$ и $K_i(x,y)$. Предполагая, что для всех ω_k, ν_l, $k>N_1$, $l>N_2$ (N_1, N_2 количество узлов дискретной сетки вдоль осей x, y соответственно) они равны нулю. Пусть

$$g = \min_{\omega_k, \nu_1 \in \Omega} \frac{U_0(\omega_k, \nu_1)}{|W|^2 + 1} > 0, \tag{10}$$

$$h_i^{\alpha}(x,y)\Delta\sigma_1 = \left[\frac{U_z(\omega_k, \nu_1)\, K_i(\omega_k, \nu_1)}{U_0(\omega_k, \nu_1) + \alpha(|W|^2+1)} \right]^{\sim}.$$

Тогда, при выборе α с учетом соотношения

$$\alpha(\delta) = \frac{g\ \delta}{||U_z(x,y)|| - \delta}, \tag{11}$$

(где $\delta = U_z(\omega_k, \nu_1) - U_z^{\alpha}(\omega_k, \nu_1)$; U_z^{α} – поле от границ h_i^{α}) имеем $U_z^{\alpha} \to U_z$ при $\delta \to 0$. Таким образом, алгоритм (10) при выборе α способом (11) является регуляризующим. При этом, с одной стороны, увеличение α приводит к повышению устойчивости решения, с другой, – к увеличению невязки полей. Оценка для α (11), позволяя получить заданную величину невязки, может не привести к требуемой точности решения. В этих условиях, при фиксированной величине параметра регуляризации, обеспечивающей устойчивость оператора (9), для уточнения решения и повышения его точности используем итерационный процесс. Он дает возможность также избавиться от неоднозначности, вызванной присутствием в левой части уравнения (9) в неявном виде (в множителе $U_z(x,y)$) членов разложения с номерами $k \geq 2$, учитывающих нелинейности задачи и зависящих от искомой величины h_i.

Для обеспечения устойчивости решения и минимизации невязки воспользуемся итерационным процессом:

$$h_i^{(n+1)}(x,y)\Delta\sigma_i = h_i^{(n)}(x,y)\Delta\sigma_i + \left[\frac{K_i(\omega,\nu) \circ [U_{zH}(\omega,\nu) - U_z^{(n)}(\omega,\nu)]}{U_0(\omega,\nu) + \alpha\ (|W|^2+1)} \right]^{\sim}, \tag{12}$$

где n – номер итерации, $U_{zH}(\omega,\nu) = \Delta U_z/\gamma$ – спектр исходного поля после соответствующих редукций и исключения эффекта плоскопараллельных слоев (по формуле (6)), $U_z^{(n)}(\omega,\nu)$ – вычисленный спектр гравитационного поля от $h_i^{(n)}(x,y)$ (прямая задача), определяемый по формуле (7), (8). Сходимость этого процесса доказана при условии $\alpha=\frac{\varepsilon}{m-1}$, где $m>1$. Аналогичные результаты получены для двумерного варианта.

Важную роль в получении решения, как отмечалось, играет выбор вида функций K_i, задающих объект, корреляционная связь с которым заложена в решении. С целью максимального использования априорных данных, K_i определяется эмпирическим соотношением:

$$K_i(x,y) = |\, h_i(x,y)\tau_i(x,y)\Delta\sigma_i(x,y)\, |,\ i= 1\div N.$$

Здесь h_i – функции, задающие превышения границ модели начального приближения (или модели, корреляционная связь с которой предполагается в решении) относительно фиксированных уровней z_i, τ_i – точность задания границы, представленная в виде условных весовых коэффициентов, $\Delta\sigma_i$ – перепады плотностей на контактах.

На основе итерационного процесса (12) получен окончательный алгоритм решения исследуемой задачи, приведены его пошаговое описание для трехмерного варианта и блок-схема для двумерного случая, характеризуется исходная информация для решения задачи. Приведенный алгоритм позволил создать необходимое программное обеспечение, которое было опробовано на модельных и практических примерах.

<u>В пятой главе</u> приводятся результаты расчетов на модельных примерах, а также в условиях реальных сложнопостроенных сред, позволяющие исследовать свойства полученного решения рассматриваемой задачи и показать работоспособность и возможности разработанных алгоритмов и программ. Проведенные исследования подтвердили предварительные теоретические предпосылки и показали, что использование равномерных критериев оптимальности позволяет равноправно варьировать границы в процессе решения, независимо от глубины их залегания, и

обеспечивает поиск решений максимально корреляционно связанных с исходной моделью. Полученные решения характеризуются хорошей устойчивостью по отношению к ошибкам как в задании наблюденного поля, так и в определении плотностных характеристик модели, а итерационный процесс, дающий решение задачи, во всех случаях хорошо сходится к решению.

Эксперименты показывают влияние выбора начального приближения h_i^*, точности построения границ τ_i и способа задания ядра K_i на результат решения. Так, форма границ модели начального приближения оказывает значительное влияние на получаемое решение. В то же время, введение дополнительной информации о достоверности построения границ с помощью весовых коэффициентов τ_i, которые дают возможность сильнее варьировать границы в процессе решения на тех участках, где они определяются менее уверенно, позволяет получать решение более адекватное реальному объекту.

Использование переменной по латерали плотности пластов свойств решения не меняет. Применение сверточного критерия совместно с весовыми коэффициентами, включенными в ядро преобразования K_i, позволяет повысить качество получаемых решений в ряде геолого-геофизических ситуаций по сравнению с другими видами критериев.

Эффективность использования разработанных алгоритмов и программ для реальных сложнопостроенных сред показана на примере расчетов по нескольким профилям, характеризующимся различными геолого-геофизическими условиями и разной степенью изученности. В частности, рассмотрены три профиля в зоне развития солянокупольной тектоники на Медведовской площади ДДВ и один профиль на шельфе Баренцева моря. Как показывают приведенные примеры, даже в условиях таких сложных разрезов, с большим количеством плотностных границ и разноплановым строением, отмечается хорошая работоспособность алгоритмов. При этом, на первом участке, где имелось достаточное количество исходной информации и начальная модель хорошо согласовалась с наблюденным полем, полученное решение уточняет лишь отдельные элементы границ. На втором участке, где исходная модель в значительной мере не соответствовала наблюденному полю, она существенно изменилась.

В последнем случае необходимо внимательно относиться к результатам интерпретации. Полученное решение позволяет согласовать имеющуюся априорную информацию с гравитационным полем, причем оно является тем элементом из класса эквивалентности, который ближе всего в смысле метрики С к исходной модели (максимально корреляционно с ней связан). В результате могут быть найдены неизвестные детали рельефа границ. Однако полученная модель не обязательно адекватна реальной геологической обстановке. В то же время, характер изменения первоначальной модели показывает интерпретатору направление дальнейших исследований и дает материал для анализа ситуации. Исходя из конкретных геолого-геофизических условий, интерпретатор принимает решение о внесении уточнений в модель среды или о необходимости привлечения дополнительной информации, в том числе и путем комплексирования с данными других геофизических методов, доразведки исследуемой территории или анализа достоверности имеющихся данных. Предлагаемый автоматизированный алгоритм решения обратной задачи структурной гравиметрии позволяет оперативно получать результаты и дает удобный инструмент в руки интерпретатора.

Таким образом, разработанная методика, алгоритмы и программы могут использоваться как на стадии детальных работ для уточнения строения разреза, так и в малоизученных районах для экспресс-анализа ситуации и проверки имеющихся геологических гипотез, что позволяет повысить оперативность и эффективность геологоразведочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований автором получены следующие результаты:

1) найдены спектральные представления явного вида решения обратной задачи структурной гравиметрии в нелинейной постановке с критерием сверточного типа для произвольного количества плотностных границ с постоянной и переменной по латерали плотностью пластов в двумерном и трехмерном вариантах;

2) с целью решения указанной обратной задачи получены аналогичные выражения для общего вида решения прямой задачи в спектральной форме; исследованы особенности решения возникающие в спектральной области при работе с дискретными конечными данными и разработаны методические приемы, направленные на получение решений с заданной точностью;

3) разработаны устойчивые алгоритмы построения решения обратной структурной задачи гравиметрии с критерием сверточного типа, доказаны регуляризующие свойства и устойчивость полученных алгоритмов, а также сходимость итерационного процесса к искомому решению;

4) на основе этих алгоритмов построена вычислительная схема решения указанной обратной задачи, выполнена ее программная реализация;

5) разработана и эмпирически обоснована методика формирования и использования равномерных критериев сверточного типа.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Кобрунов А.И., Журавлева О.И. Использование спектральных представлений для решения обратной задачи гравиметрии (равномерная оптимизация)// Изв. АН СССР.- Сер. Физика Земли.- N5.- 1991.-С.47-58.
2. Кобрунов А.И., Журавлева О.И. Схема решения нелинейной структурной задачи на основе использования спектральных представлений (равномерная оптимизаци)// Докл. АН УССР.- Сер. Б, Геол.,хим. и биол. науки.- N11.- 1990.- С.18-21.
3. Журавлева О.И. Использование спектральных представлений для решения прямой задачи гравиметрии структурного типа// Изв.вузов.- Геология и разведка.- N7.- 1990.- С.106-113.
4. Кобрунов А.И., Журавлева О.И. Использование спектральных представлений для решения нелинейной структурной задачи гравиметрии/Теория и практика геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Тезисы докл.Всесоюзн. грав. семинара им.Успенского.-Алма-Ата.-1990.-С.47-48.
5. Журавльова О.I., Денисюк Р.П. Особливостi розв'язку зворотної структурної задачi гравiметрiї з рiвномiрним критерiєм оптимальностi/ Тези науково-технiчної конференцiї професорсько-викладацького складу IФДТУНГ.- Iвано-Франкiвськ.- 1995.- С.96.
6. Журавльова О.I., Денисюк Р.П. Про стiйкiсть розв'язку зворотних задач структурної гравiметрiї/ Тези науково-технiчної конференцiї професорсько-викладацького складу IФДТУНГ.- Iвано-Франкiвськ.- 1996.- С.116.
7. Журавльова О.I. Використання рiвномiрної оптимiзацiї при розв'язку зворотної задачi структурної гравiметрiї для пластiв iз змiнною густиною// Розвiдка i розробка нафтових та газових родовищ. - Львiв.- 1995, вип.32.- С.24-27.

Журавльова О.І. Методи розв'язку обернених задач структурної гравіметрії на основі рівномірних критеріїв оптимальності.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.12 - Геофізика. Інститут геофізики ім.С.І.Субботіна НАН Укрїни, Київ, 1996 р.

Захищається сім наукових праць, в яких відображені результати теоретичних та експериментальних досліджень методів розв'язку оберненої задачі структурної гравіметрії на основі застосування рівномірної оптимізації та спектральних перетворень з критерієм згорточного типу. Єдиність отриманого розв'язку забезпечується принципом оптимальності розглянутої системи границь відносно заданого критерію, що вміщує апріорну інформацію про параметри середовища. Отримані вирази для спектральної форми явного виду оператора розв'язку цієї оберненої задачі в нелінійній постановці для довільної кількості геогустинних границь з постійною і змінною по латералі густиною пластів, а також для загального виду розв'язку відповідної прямої задачі. Досліджені особливості, що виникають при практичному використанні спектральних перетворень. Побудован стійкий алгоритм розв'язку зазначеної оберненої задачі. Розроблена і експериментально обгрунтована методика застосування цього алгоритму та формування і використання рівномірних критеріїв згорточного типу.

Ключові слова: структурна гравіметрія, обернена задача, мінімізація, спектр, модель, алгоритм.

Zhuravlyova O.I. Methods of solving of inverse problems of structural gravimetry based on uniform optimum criteria.

Thesis for a degree of Master of Physics and Mathematics with speciality 01.04.12 - Geophysics. Institute of Geophysics of Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev, 1996.

7 research papers dealing with results of theoretical and experimental investigations of methods to solve inverse problems of struktural gravimetry are defended. The methods are based on usage of uniform optimization and spectral transformations with convolution criterion. The uniqueness of the obtained solution is maintained by optimum principle for the considered boundary system with regard to the accepted criterion that includes apriori parameters of medium. Expressions of spectral form for explicit kind

operator of solving of this inverse non-linear problem for arbitral quantity of density boundaries and constant/variable lateral density of layers and for common type of solution of corresponding direct problem are obtained. Features appearing when practical use of spectral transformations are studied. A stable solving algorithm of the named inverse problem is developed and realized. A technique of using of the mentioned algorithm and of forming of uniform convolution criteria is developed and experimentaly grounded.

operator of solving of this inverse non-linear problem for arbitral quantity of density boundaries and constant/variable lateral density of layers and for common type of solution of corresponding direct problem are obtained. Features appearing when practical use of spectral transformations are studied. A simple solving algorithm of the named inverse problem is developed and realized. A technique of using of the mentioned algorithm and of forming of uniform convolution criteria is developed and experimentally grounded.

Формат паперу 60 X 90/[16] Папір офсетний 1.5 друк.арк.
Замовлення 678 Тираж 120 екз.
Віддруковано на різографі ПФ "ЕКОР"