

УДК 550.831.017

© А.В. Мичурин, А.В. Пугин, А.А. Симанов

А.В. Мичурин, А.В. Пугин, А.А. Симанов

ВОЗМОЖНОСТИ ГАРАНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ РЕШЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ



Введение

Обратные задачи геофизики (в том числе задачи гравirazведки и магниторазведки) относятся к классу некорректных задач, т.е. их решение в общем случае является неоднозначным и неустойчивым. Определенные успехи в разработке теории метода подбора не могут устранить его объективные недостатки. По полю, даже измеренному с большой точностью, при отсутствии априорной информации о возмущающих объектах, принципиально невозможно однозначно восстановить число объектов, составляющих модель, ее пространственное положение и физические параметры [1]. Поэтому каждый новый метод и его программно-алгоритмическая реализация для решения обратных задач представляет существенный интерес, а проблема разработки новых модификаций уже использующихся методов остается актуальной.

Среди применяющихся на практике методов решения нелинейной обратной задачи гравirazведки наиболее широкое распространение имеют различные модификации метода подбора, базирующиеся на итерационной корректировке геометрических параметров «стартовых» петроплотностных и петромагнитных моделей геологической среды. Процесс корректировки модели обычно заканчивается при достижении требуемого (достаточно малого) значения невязки наблюдаемого и модельного полей.

Однако во многих случаях результаты интерпретационных построений, отвечающие сравнительно малому значению невязки между наблюдаемым и подобранным полями, могут противоречить имеющимся представлениям о формах, размерах и пространственных взаимоотношениях геологических тел в изучаемом объеме среды. В качестве альтернативы традиционным методам решения обратной задачи можно рассматривать конечно-элементный подход к описанию изучаемого объема геологической среды, названный В.Н. Страховым, М.И. Лапиной, Овчаренко А.В. «монтажным методом» и получивший свое развитие в работах П.И. Балка и его учеников [2-6]. Монтажный подход к решению обратной задачи гравirazведки снимает

проблему неустойчивости в ее классическом понимании. Конечная размерность модели и природные ограничения на ее плотностные (магнитные) и геометрические параметры изначально приводят к компактному множеству возможных решений, а учет определенного объема априорной информации обеспечивает получение геологически-содержательных решений обратных задач [7].

Алгоритм решения трехмерной обратной задачи гравirazведки в рамках гарантированного подхода

Под монтажными классами источников поля понимают множество всевозможных распределений тяготеющих масс, размещенных по конфигурационным областям Ω , составленным из произвольного числа элементов замощения ω_a и удовлетворяющих определенным априорным ограничениям, прежде всего условиям связности и односвязности. Предполагается, что совокупность монтажных элементов (в наиболее характерном случае это правильные геометрические фигуры) образует замощение достаточно обширной нижней полуплоскости, заведомо содержащей источники поля. Основные операции в классе конфигурационных распределений масс выполняются с использованием понятий ядра $\beta[\Omega]$, оболочки $\hat{L}[\Omega]$, внутреннего ядра $\beta_0[\Omega]$ и границы $\tilde{A}[\Omega]$ конфигурации Ω : $\beta[\Omega]$ – суть множество элементов $\omega_a \in \Omega$; $\hat{L}[\Omega]$ – множество всех элементов $\omega_a \notin \beta[\Omega]$, граничащих с элементами ядра $\beta[\Omega]$; $\beta_0[\Omega]$ – множество элементов $\omega_a \in \Omega$, граничащих только с элементами этого же ядра; $\tilde{A}[\Omega]$ – множество элементов $\beta[\Omega]$, не вошедших в $\beta_0[\Omega]$ (рис. 1) [8].

В простейшей постановке алгоритм решения трехмерной обратной задачи гравirazведки монтажным методом для изолированного тела Ω^0 известной плотности $\sigma^0 > 0$ состоит в том, чтобы, отправляясь от начальной конфигурации Ω^0 , выстроить последовательность $\Omega^0, \Omega^1, \Omega^2, \dots$, имеющую пределом некоторую конфигурацию Ω^* , поле которой при подобранной плотности $\sigma^* \approx \sigma^0$ согласуется с измерениями гравитационного поля. Переход от конфигурации Ω^{n-1} к Ω^n происходит путем внесения в ядро

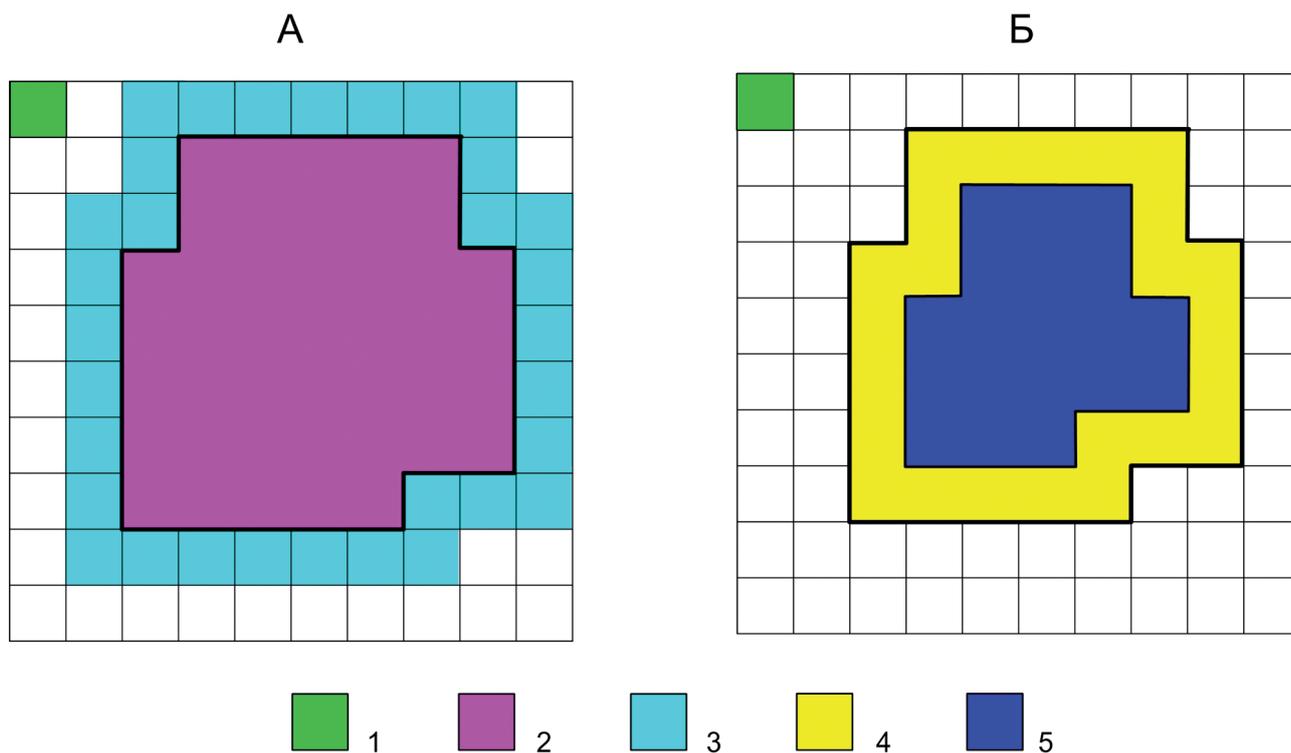


Рис. 1. Графическая иллюстрация основных понятий, используемых в монтажном методе: оболочка $O[\Omega]$ и ядро $\beta[\Omega]$ (А); граница $\hat{A}[\Omega]$ и внутренность $\hat{A}[\Omega]$ двумерной конфигурации Ω (Б):
 1 – отдельный элемент замощения ω_a ; 2-5 – элементы замощения ω_a , принадлежащие:
 2 – ядру $\beta[\Omega]$, 3 – оболочке $O[\Omega]$, 4 – границе $\hat{A}[\Omega]$, 5 – внутреннему ядру $\beta_0[\Omega]$ конфигурации Ω

$\beta[\Omega^n]$ одного элемента ω_a из Ω^{n-1} , обеспечивающего наименьшую невязку подбора. Необходимо так же отметить, что последовательность $\Omega^0, \Omega^1, \Omega^2, \dots, \Omega^{n-1}, \Omega^n, \dots, \Omega^*$ выстраивается с учетом имеющейся у интерпретатора априорной информации [9].

Известно, что обратная задача гравиразведки не имеет единственного решения: одному и тому же наблюдаемому гравитационному полю могут отвечать различные аномалиеобразующие объекты [10]. Совпадение наблюдаемого и модельного полей в пределах точности съемки, достигнутое после выполнения интерпретации, только доказывает, что построенный вариант разреза не противоречит фактическим данным. Для объективной оценки достоверности интерпретации нужно рассматривать не одно решение обратной задачи гравиразведки, а все множество этих решений (которое в общем случае является бесконечным) либо репрезентативную выборку таких решений. Предложенный Л.В. Канторовичем в 60-е годы XX века и в дальнейшем развитый в работах П.И. Балка гарантированный подход к оценке качества решения обратной задачи гравиразведки как раз позволяет решить эту задачу [11, 12].

П.И. Балк и др. показали на модельных и практических примерах целесообразность использования

гарантированного подхода для решения двумерных обратных задач гравиразведки [13, 14]. Авторами статьи был реализован трехмерный вариант данного подхода, который рассматривается далее в настоящей статье.

На первом этапе происходит ввод наблюдаемого поля и рельеф поверхности наблюдений. Задается пороговое значение невязки между наблюдаемым и модельным полем, которое определяется исходя из точности съемки на изучаемом участке. По априорным данным определяется предполагаемая плотность аномалиеобразующего объекта и задается область поиска решения трехмерной обратной задачи гравиразведки, в пределах которой заведомо содержится аномалиеобразующий объект.

Второй этап заключается непосредственно в получении репрезентативного конечного множества частных решений трехмерных обратных задач гравиразведки монтажным методом, т.е. набора аномалиеобразующих объектов (конфигураций), отличающихся друг от друга. Необходимым условием каждого частного решения являлось построение такой конфигурации, которая отвечала бы требуемой невязке между наблюдаемым и модельным полем и соответствовало плотности, близкой к априорно заданной.

На третьем этапе для оценки достоверности решения трехмерной обратной задачи гравиразведки и локализации единичного возмущающего объекта проводилось объединение построенных конфигурационных распределений масс. Строилась функция $\mu(\omega_a)$, такая, что: $\mu(\omega_a) = 1$, если $\omega_a \subset \Omega^*$; $\mu(\omega_a) = 0$, если $\omega_a \not\subset \Omega^*$; при этом получается N вариантов пространственных распределений ее значений (бинарных матриц), отвечающих всем имеющимся решениям обратной задачи гравиразведки. Затем проводится объединение всех этих решений, сводящееся к суммированию N значений $\mu(\omega_a)$, характеризующих одни и те же относительно малые области изучаемого объема геологической среды. Результаты такого суммирования представляют собой целочисленную функцию $v = v(\omega_a)$, значения которой располагаются внутри отрезка $[0, N]$. Функция v отвечает пересечению допустимых решений обратной задачи гравиразведки, каждое из которых представлено объединением конечного числа элементов ω_a : $\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \Omega_3 \dots \Omega_N$.

Эту функцию $v(\omega_a)$ можно также рассматривать как частоту попадания элемента замощения ω_a во фрагмент моделируемой конфигурации Ω^* в серии решений обратной задачи гравиразведки, что позволяет естественным образом перейти к вероятностной оценке искомым геометрических параметров. Нормированная функция $v(\omega_a)^* = v(\omega_a)/N$ характеризует вероятность P присутствия аномалиеобразующего объекта в элементарном объеме среды ω_a , полученную в результате N равновозможных исходов эксперимента. Очевидно, что в пределах области с нулевыми значениями функции $v^* = 0$ аномалиеобразующие массы будут отсутствовать ($P=0\%$), а область значений $v^* = 1$ представляет собой фрагмент геологической среды, гарантировано принадлежащий возмущающему объекту Ω^T ($P = 100\%$) [15].

Алгоритм гарантированного подхода для решения трехмерной обратной задачи гравиразведки был реализован с использованием системы объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0 и протестирован на модельных и практических примерах.

Устойчивость алгоритма к выбору порогового значения невязки, уровню помех в исходных данных и к количеству частных решений

Рассмотрим результаты гарантированного подхода к оценке качества решения трехмерной обратной задачи гравиразведки, выполненные на модельном примере. В качестве модели использовался объект в виде прямоугольной призмы, расположенной в интервале глубин 2-10 км со стороны основания 4 км, избыточная плотность $-0,2$ г/см³. «Наблюденное» гравитационное поле,

заданное в узлах квадратной сети с шагом 500 м в 6561 точке, имеет максимальную амплитуду 6,36 мГал. Поверхность наблюдения горизонтальная ($z = 0$), региональный фон отсутствует (рис. 2).

Поиск допустимых решений обратной задачи осуществлялся в пределах области размером $40 \times 40 \times 15$ км, состоящей из 24 000 элементов замощения, для тела с избыточной плотностью $-0,2$ г/см³. В качестве элемента замощения использовался куб со стороной основания 1 км.

Для каждого выбранного порогового значения невязки полей $\delta_1 = \pm 0,20$, $\delta_2 = \pm 0,30$, $\delta_3 = \pm 0,40$ мГал строилось $N = 1000$ частных решений обратной задачи гравиразведки при различных центрах кристаллизации (элементах, заведомо принадлежащих источнику поля – начальных приближениях), удовлетворяющих априорным допущениям. Необходимым условием при этом являлось отличие частных решений друг от друга хотя бы на один элемент замощения.

Синтез всех 1000 решений обратной задачи гравиразведки при заданных пороговых значениях невязки позволил построить пространственное распределение функции локализации, характеризующей вероятность присутствия искомого объекта в исследуемом объеме среды. При этом можно отметить, что при низких параметрах $|\delta_1| \leq 0,2$ и $|\delta_2| \leq 0,3$ мГал выделяется область $D2$, гарантированно принадлежащая аномалиеобразующему объекту, и область $D1$, в пределах которой может содержаться объект (рис. 3а, б, г, д).

Как показали исследования, дальнейшее увеличение порогового значения невязки приводит к закономерному увеличению области $D1$ и уменьшению $D2$. Легко видеть, что области геологического пространства, отвечающие значениям вероятностей $v^* \geq 0,3$ при $|\delta_3| \leq 0,4$, в плане практически совпадают с изучаемой геоплотностной неоднородностью, но элементы, гарантированно принадлежащие объекту ($P = 100\%$), отсутствуют (рис. 3в, е). Эта ситуация в основном характерна для практических задач, когда объект неоднороден по своему плотностному составу и не имеет резких границ с вмещающей средой, а уровень помех в исходном поле достаточно высок. В этом случае говорить уже можно только о вероятности присутствия искомого объекта в некоторой части объема среды. Поэтому полученные в результате интерпретации представления о геоплотностных неоднородностях целесообразно сопоставить с данными других геофизических методов и на этой основе проводить решение задач «обнаружения и локализации» возмущающих объектов.

При использовании того же источника поля и той же априорной информации, что и в предыдущем

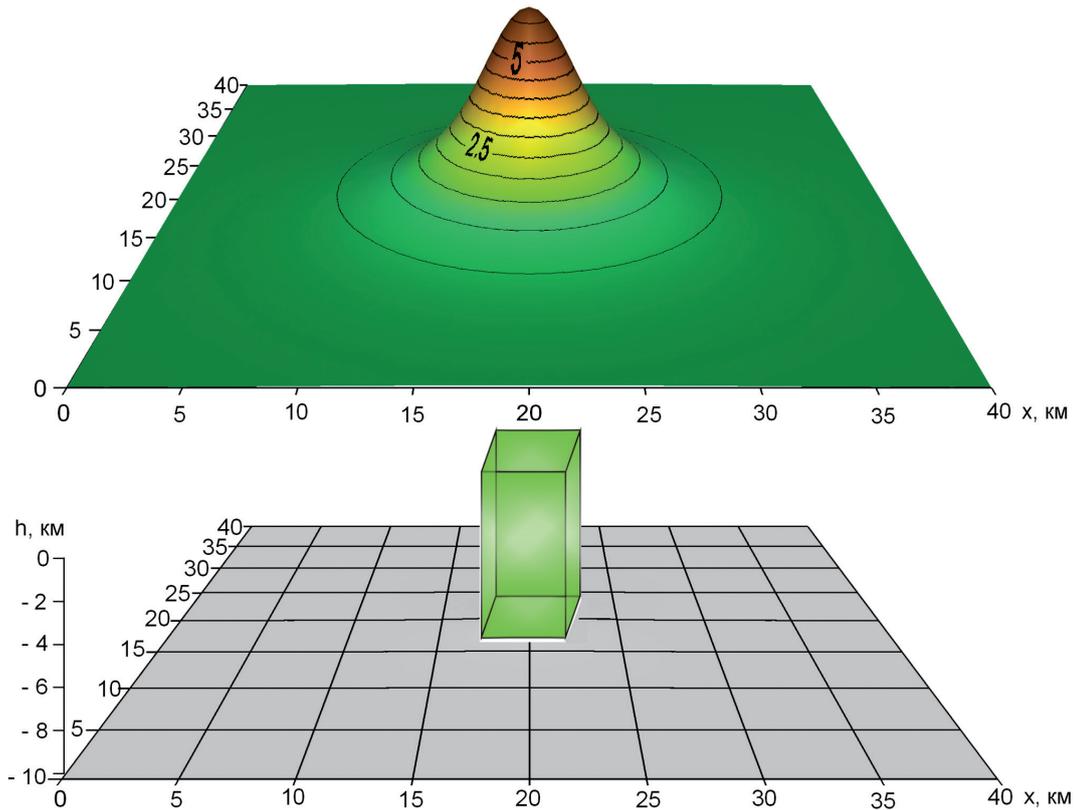


Рис. 2. Модельный пример: аномалиеобразующий объект и объемное изображение созданного им гравитационного эффекта

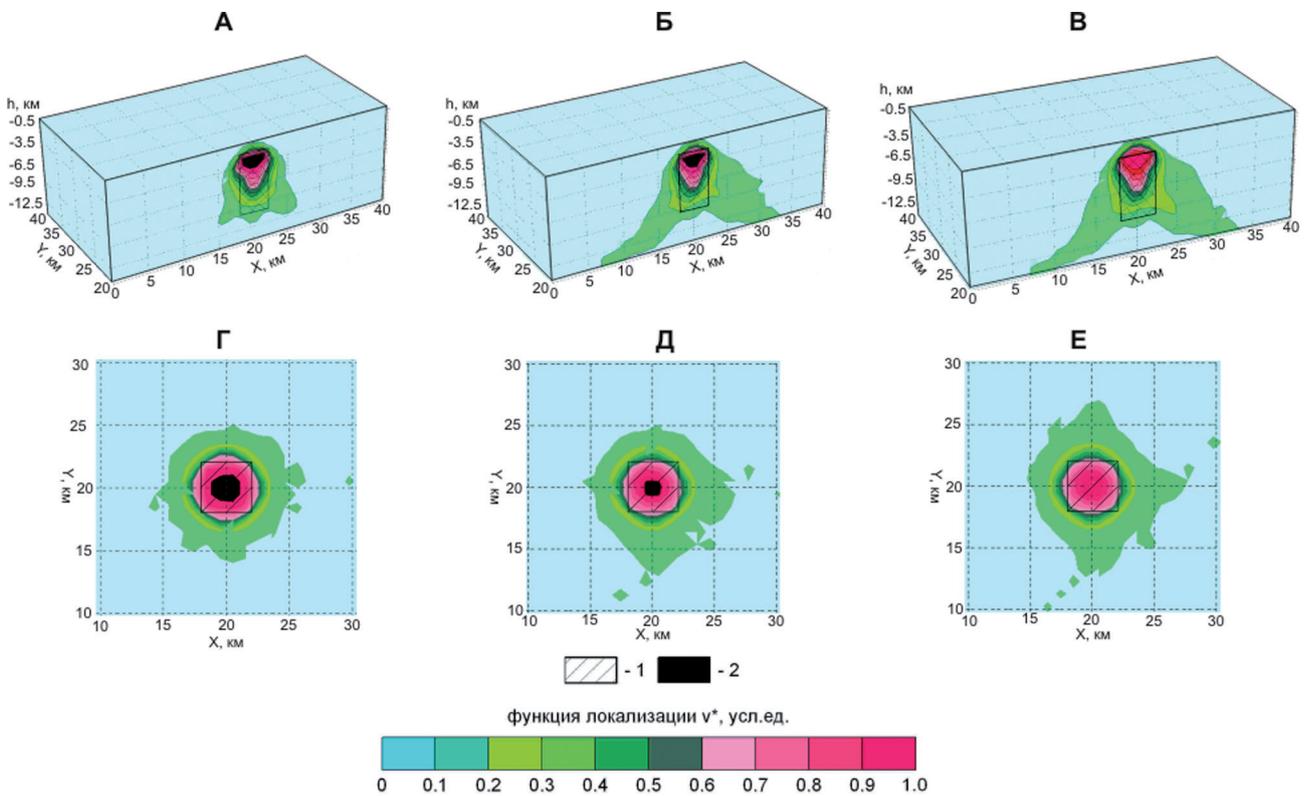


Рис. 3. Блок-диаграммы пространственного распределения функции локализации при различных пороговых значениях невязки полей.

Разрез функции локализации по линии $Y = 20,5$ км: А – $\pm 0,2$ мГал; Б – $\pm 0,3$ мГал; В – $\pm 0,4$ мГал.

Срез функции локализации на уровне $h = 3,5$ км: Г – $\pm 0,2$ мГал; Д – $\pm 0,3$ мГал; Е – $\pm 0,4$ мГал.

1 – аномалиеобразующий объект; 2 – фрагмент среды, гарантированно принадлежащий источнику поля (D2)

примере, попытаемся оценить помехоустойчивость метода. Зададим пять вариантов нормальной помехи в «наблюденном» поле с разными амплитудами – $СК0 \pm 0,16, \pm 0,32, \pm 0,64, \pm 0,96, \pm 1,28$ мГал, что соответствует 2,5%, 5%; 10%, 15% и 20% от максимальной амплитуды «наблюденного» поля. Для каждого из этих вариантов выполняли серию из $N = 1000$ решений обратной задачи гравirazведки. Полученные результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствует о том, что даже при высоком уровне помех, достигающем 20% от максимальной амплитуды интерпретируемого поля, удается уверенно локализовать возмущающий объект, практически при том же среднем значении функции локализации и ее дисперсии в пределах истинного положения аномалиеобразующего объекта. Необходимо так же отметить закономерное значительное увеличение объема области $D1$ с ростом амплитуды помех.

В результате исследований по определению достаточного конечного множества решений обратной задачи гравirazведки было выявлено, что репрезентативной можно считать выборку, состоящую более чем из 100 решений (рис. 4). Именно с этого значения наблюдаются выход на асимптоты графиков зависимости количества решений от среднего значения функции локализации и от ее дисперсии в пределах истинного положения аномалиеобразующего объекта. Дальнейшее увеличение решений обратной задачи гравirazведки в рамках гарантированного подхода не приводит к значительному увеличению достоверности получаемых результатов.

Функция фон-подбор

Достоинством предлагаемого алгоритма является включенная в него процедура «фон-подбор». Она позволяет учитывать при решении обратной задачи гравirazведки региональный фон различного порядка, присутствующий в наблюдаемом поле. Кроме того на модельных примерах показаны преимущества учета фона на каждом шаге итерационного процесса, по сравнению с ситуацией, когда непосредственное снятие фона происходит до начала решения

обратной задачи. В качестве модели используется тот же источник поля, что и в предыдущих примерах. В рамках исследования выполняется одно решение обратной задачи при одинаковом местоположении начального элемента.

В первом варианте рассчитанное поле от аномалиеобразующего объекта осложнено фоном первого порядка. В одном случае фон рассчитывается непосредственно в процессе решения обратной задачи гравirazведки на каждом шаге итерационного процесса, при каждом присоединении элемента замощения, а в другом – фон снят предварительно. Наблюдаем, что процедура фон-подбор дает 86% совпадение модельной и подобранной конфигурации, тогда как предварительное снятие региональной составляющей обеспечивает пространственное совпадение лишь в 26% (табл. 2). При осложнении поля модели фоном, описываемым алгебраическими полиномами 2-го и 3-го порядков, снова наблюдаем, что процедура фон-подбор дает более точное совпадение модельной и подобранной конфигурации (более 80%). При этом результаты решения обратной задачи гравirazведки в случае предварительного снятия фона заметно хуже, не достигается даже 50% совпадение подбираемых конфигураций с истинным положением источника поля.

Практические примеры

На рис. 5 приведены результаты решения обратной задачи гравirazведки по данным гравиметрической съемки масштаба 1:50 000. Территория исследований находится к северо-востоке Пермского края, на стыке Восточно-Европейской платформы и Соликамской депрессии, захватывая оба тектонических элемента. Площадь исследований составляет 1040 кв. км. Гравиметрическая съемка выполнена по профилям, расстояние между которыми 2 км, расстояние между пунктами наблюдений на профиле 200 м.

Предполагается, что аномалия силы тяжести в основном обусловлена интрузией базит-гипербазитового состава с избыточной плотностью

Таблица 1

Результаты решений обратных задач гравirazведки

Уровень помех, %	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0
Среднее значение v^* в пределах исходного объекта, усл.ед.	0,539	0,510	0,519	0,517	0,502
Дисперсия среднего значения v^* в пределах исходного объекта, усл.ед	0,293	0,286	0,275	0,286	0,286
Объем области $D1$, км ³	3453	4586	5138	5534	6844

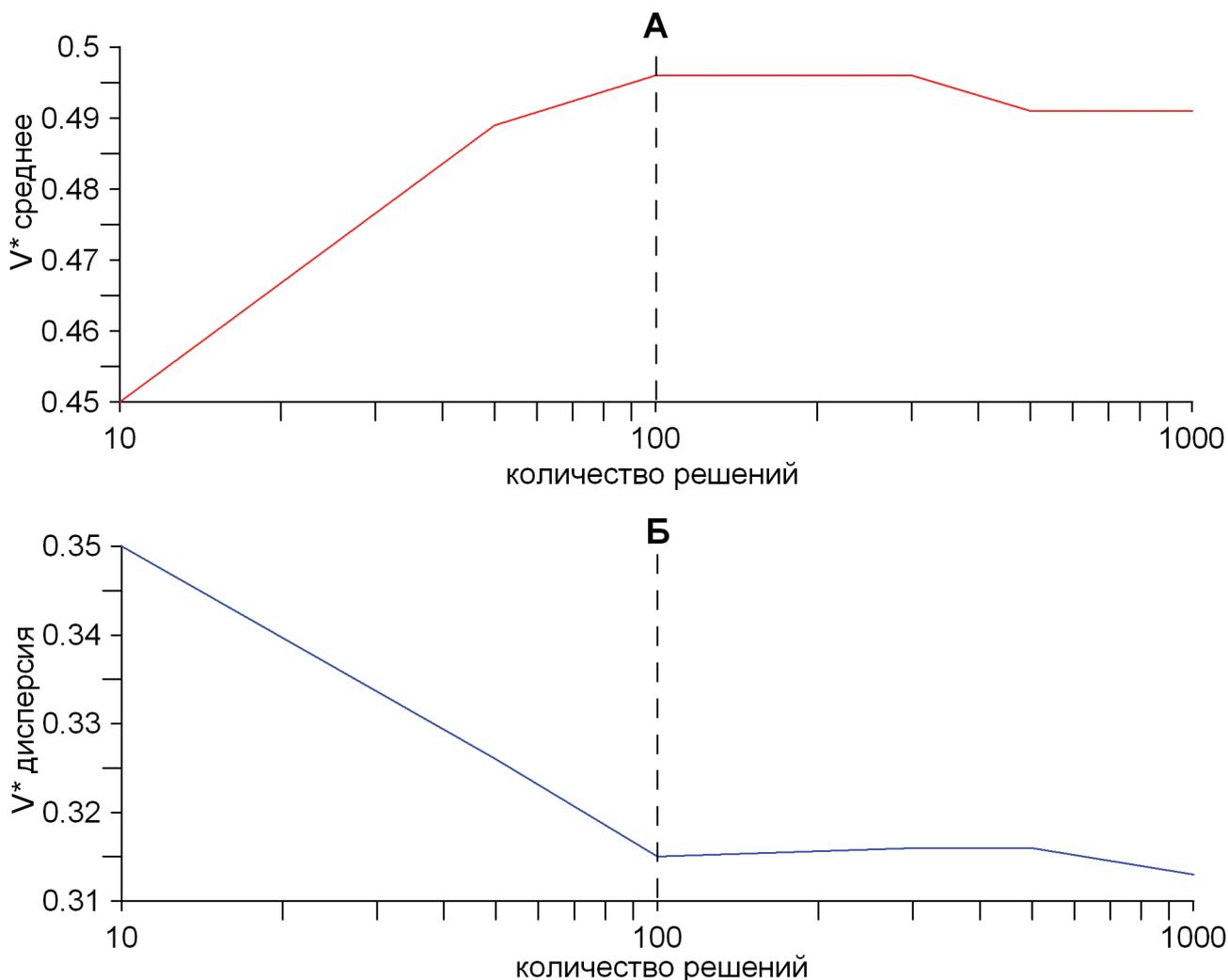


Рис. 4. Графики зависимости количества решений от среднего значения функции локализации (А) и от ее дисперсии (Б) в пределах истинного положения аномалиеобразующего объекта

Таблица 2

Совпадение подираемых конфигураций с исходным положением аномалиеобразующего объекта на поле осложненным фоном различного порядка

Вид фона	Процедура предварительного снятия фона. Совпадение с источником поля в %	Процедура фон-подбор. Совпадение с источником поля в %
1-го порядка	26	86
2-го порядка	42	83
3-го порядка	42	80

(по отношению к вмещающим породам) составляет 0,2 г/см³, глубина залегания – 3 км ≤ h ≤ 20 км. Для выделения гравитационного эффекта, обусловленного преимущественно влиянием кристаллического фундамента, поле силы тяжести было пересчитано в верхнее полупространство на уровень 5 км, что отвечает средней глубине поверхности кристаллического фундамента на исследуемой территории.

Построение N = 100 частных решений трехмерной обратной задачи гравиразведки с использованием монтажных технологий интерпретации при δ = 0,10 мГал по преобразованному полю позволило охарактеризовать пространственное распределение функции локализации v* и выделить аномалиеобразующий объект. Как видно из рис. 5, в исследуемом объеме геологической среды в пределах изучаемой

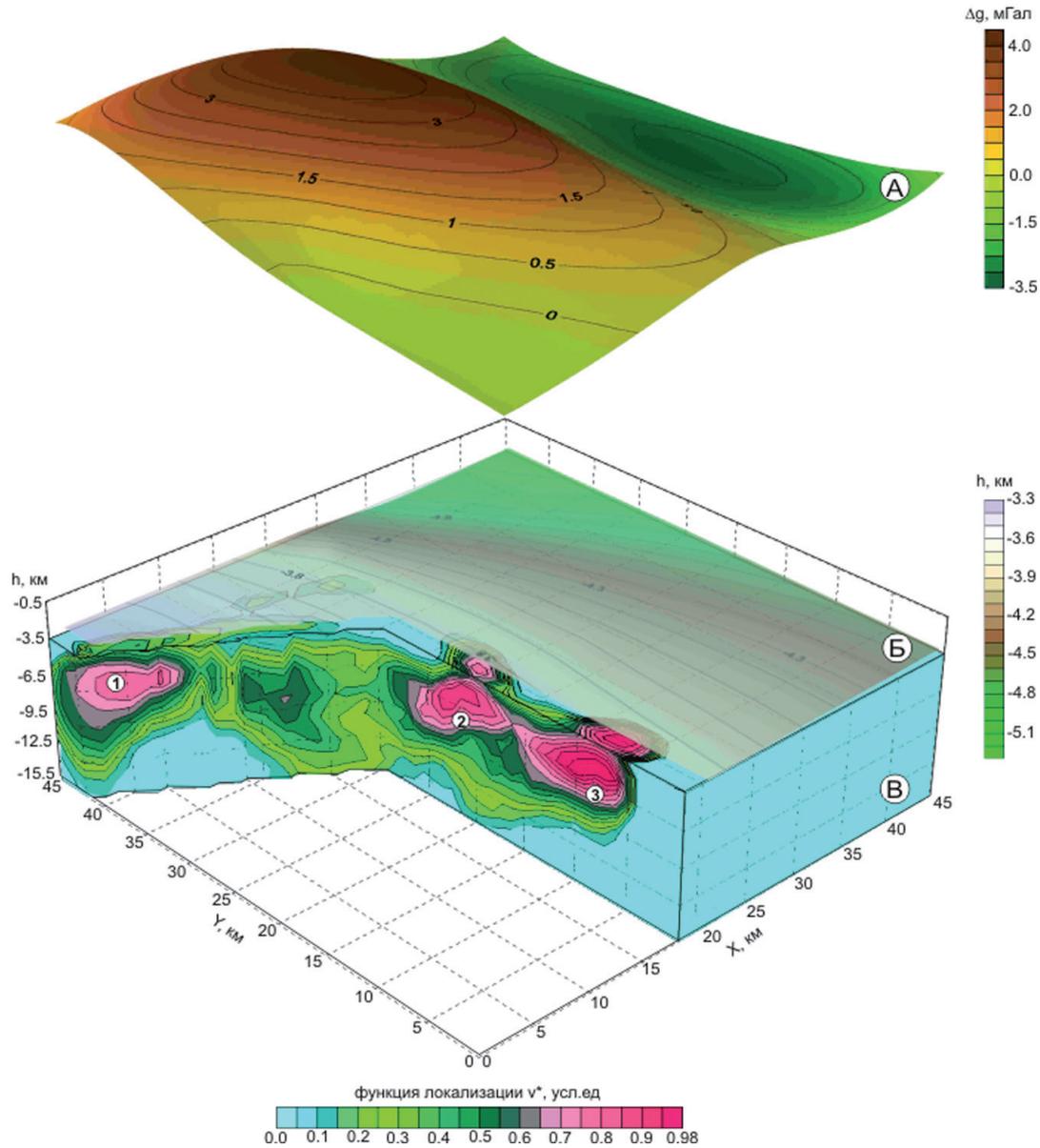


Рис. 5. Интерпретация гравитационного поля на исследуемом участке.

А – гравитационное поле Δg на уровне 5 км; Б – рельеф поверхности кристаллического фундамента в пределах изучаемой площади по данным (С.Г. Бычков, 2010 [16]); В – блок-диаграмма функции локализации. 1, 2, 3 – номера апофизов

площади отмечаются три апофиза (1, 2, 3). Наиболее высокая вероятность выхода на поверхность фундамента у апофизов 2 и 3, т.к. функция локализации имеет максимальные значения на этих выступах в пределах глубин порядка 3,3–6,5 км. Первый апофиз локализуется в интервале глубин 5–9 км. Кроме того, наблюдается высокая вероятность пространственной связи между выделенными выступами.

В качестве второго практического примера применения гарантированного подхода при решении трехмерных обратных задач гравиразведки использовались материалы высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1:25 000, выполненной на Востоке Пермского края. Целью работ являлось выделение

потенциально хромитоносных гипербазитовых массивов, с избыточной плотностью $0,25 \text{ г/см}^3$. Полученный в результате 100 решений обратных задач куб функции локализации позволил выделить наиболее вероятную область развития пород интрузивного комплекса, расположенного в центральной части площади в интервале глубин от 100 до 1000 метров и имеющее меридиональное направление (рис. 6).

Выводы

Возросшие вычислительные возможности компьютеров позволяют решать принципиально новые интерпретационные задачи гравиразведки, ведущие к повышению качества получаемых

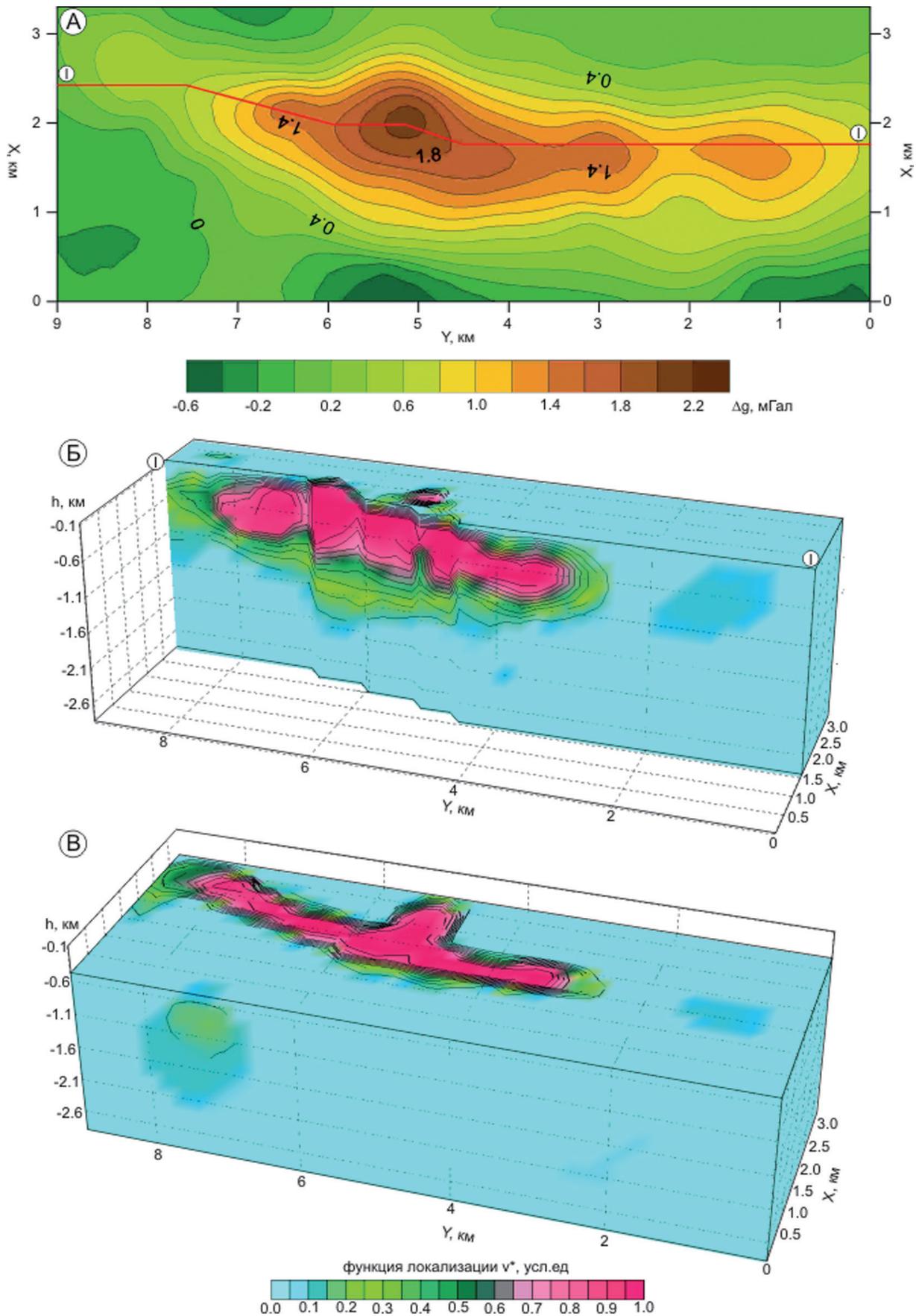


Рис. 6. Результаты применения гарантированного подхода при поисках хромитового оруденения
 А – гравитационное поле Δg на уровне 270 м (максимальная высотная отметка рельефа местности);
 Б – разрез функции локализации по линии I-I; В – срез функции локализации на уровне $h = -0,5$ км

геологических результатов. Существующая техническая возможность формирования различных конечных множеств 3D решений обратных задач гравиразведки позволяет построить распределение функции локализации в пространстве и тем самым приближенно охарактеризовать вероятность обнаружения аномалиеобразующего объекта в элементарных объемах геологической среды.

Выполнение интерпретационных построений с применением функции локализации, может существенно повысить вероятность вскрытия искомым аномалиеобразующих объектов в заданных интервалах глубин поисковыми и разведочными скважинами, рекомендованными по гравиметрическим данным.

Представленный в статье алгоритм в дальнейшем планируется распространить на более сложные распределения масс, т.е. на присутствие в моделируемом разрезе нескольких геоплотностных неоднородностей. Функцию локализации можно применить также и для комплексной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-05-00414-а, 12-05-31138-мол-а) и программы исследований ОНЗ РАН (проект 12-Т-5-1012). Авторы выражают глубокую благодарность доктору физико-математических наук А.С. Долгалю и доктору физико-математических наук П.И. Балку, идеи которых развиваются в данной статье.

Ключевые слова: гравиразведка, обратная задача, вероятность, функция «фон-подбор», функция локализации, аномалиеобразующий объект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдшмидт В.И. Оптимизация процесса количественной интерпретации данных гравиразведки. М. : Недра, 1984. – 184 с.
2. Долгаль А.С., Христенко Л.А. О возможности развития монтажного подхода к решению обратной задачи гравиметрии в классе трехмерных моделей источников поля // Горное эхо. 2007. № 1 (27). С. 32-37.
3. Страхов В.Н., Лапина М.Н. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР, 1976, № 2. – С. 344 - 347.
4. Овчаренко А.В. Подбор сечения двухмерного тела по гравитационному полю // Вопросы нефтяной и рудной геофизики. – Алма-Ата: Изд-во Казахского политехн. ин-та, 1975. Вып. 2. – С. 71-75.
5. Мичурин А.В., Симанов А.А. Применение ГИС технологий при моделировании глубокозалегающей интрузии по гравитационному полю // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы юбилейной конф., посвященной 80-летию геолог. ф-та и 95-летию Перм. ун-та. Перм. гос. Нац. Иссл. Ун-т.– Пермь, 2011. – С. 98-100.
6. Пугин А.В., Симанов А.А., Мичурин А.В., Новикова П.Н. Аппроксимации как инструмент успешного решения прикладных геофизических задач // Материалы VII Международной научно-практической конкурс-конференции «ГЕОФИЗИКА-2011». 3-7 октября 2011 г. – С. 103-104.
7. Балк П.И. Использование априорной информации о топологических особенностях источников поля при решении обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР, 1989. – Т. 309. – № 5. – С. 1082-1084.
8. Долгаль А.С., Мичурин А.В. Развитие конечноэлементного подхода к интерпретации гравиметрических данных // Геофизические методы при разведке недр / отв. ред. Л.Я. Ерофеев, В.И. Исаев – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 40-44.
9. Долгаль А.С., Балк П.И., Деменев А.Г., Мичурин А.В., Новикова П.Н., Рашидов В.А., Христенко Л.А., Шархимуллин А.Ф. Использование метода конечных элементов при интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки // Вестник КРАУНЦ. – 2012. – № 1 (19). – С. 108-126.
10. Булах Е.Г., Марков М.Н., Бойко П.Д. Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. – Киев : Наук. думка, 1984. – 112 с.
11. Балк П.И. О надежности результатов количественной интерпретации гравитационных аномалий // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1980. – № 6. – С. 43-57.
12. Кантарович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибир. матем. журн. – 1962. – № 5. – С. 701-709.
13. Балк П.И., Долгаль А.С., Христенко Л.А. Локализация геологических объектов по данным гравиразведки при неполной информации о плотности горных пород. // Доклады Академии наук. 2012. – Т. 442. – № 5. – С. 686-690.
14. Долгаль А.С. Новые постановки обратных задач геофизики и методы их решения // Стратегия и процессы освоения георесурсов. : сборник научных трудов. – Вып. 9. – Пермь : Ги УрО РАН, 2011. – С. 120-123.
15. Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф. Повышение точности интерпретации моногеничных гравитационных аномалий // Геоинформатика. – 2011. – № 4. – С. 49-56.
16. Бычков С.Г., Неганов В.М., Мичурин А.В. Нефтегазгеологическое районирование территории Пермского края // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2010. – 28 с. – URL: http://www.ogbus.ru/Buchkov/Buchkov_2.pdf. (дата обращения 12.03.2013).