

М.С. Зейгельман, Т.Л. Михеева, Н.В. Панченко

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
г. Киев*

ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНТУРА ГРАВИТИРУЮЩЕГО ТЕЛА. МЕТОДИКА ПОИСКА МНОГОВАРИАНТНЫХ РЕШЕНИЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Рассматривается задача определения формы и глубинных границ гравитирующего тела по полю силы тяжести. В ходе вычислительного эксперимента с теоретическими моделями сформулированы положения, касающиеся особенностей решения поставленной обратной задачи, характера проявления приближенной эквивалентности. Предлагается технология поиска представительной выборки решений обратной задачи.

Ключевые слова: гравиметрия, обратная задача, автоматизированный подбор, эквивалентные решения, устойчивое решение, контур гравитирующего тела.

В практике интерпретации гравитационных аномалий над рудными объектами и интрузивными массивами часто возникает задача определения формы и глубинных границ возмущающего тела по полю силы тяжести, заданному на земной поверхности. В теории интерпретации гравитационных данных такую задачу принято называть задачей восстановления контура гравитирующего тела (в случае ее 2-х или 2,5-мерной постановки).

Рассматриваемой обратной задаче свойственна теоретическая неоднозначность; для перехода к единственности ее решения необходимо задаваться значением избыточной плотности гравитирующих масс [4, 7]. Помимо теоретической неоднозначности серьезные осложнения возникают из-за влияния приближенной эквивалентности [1, 4, 5]. При интерпретации наблюдаемых аномалий можно получить множество практически эквивалентных распределений гравитирующих масс, отличающихся друг от друга особенностями конфигурации и положением контура возмущающего тела.

Технология поиска многовариантных решений обратной задачи формировалась в процессе вычислительных экспериментов на ЭВМ. Было отобрано несколько часто встречающихся на практике (типовых) интерпретационных ситуаций, на основе которых были сформированы со-

ответствующие модели. На модельных примерах имитировался процесс поиска решений обратной задачи; для этой цели были задействованы алгоритмы автоматизированного подбора [2, 3]. В процессе вычислительных экспериментов на ЭВМ детальному исследованию были подвергнуты три модельные формы: модель НТ – наклонное гравитирующее тело (рис. 1); модель АМ – интрузивное тело большой горизонтальной мощности (рис. 2); модель ИНТ – интрузив сложной формы (рис. 1).

Для представления гравитирующего тела использовался класс горизонтально расположенных, ограниченных по простиранию призм с вертикальным сечением в виде односвязного многоугольного контура, составленного из отрезков прямых. Размеры тела по простиранию и его однородно распределенная избыточная плотность считались известными по априорным данным. Искомыми параметрами служили координаты угловых точек контура.

В процессе вычислительных экспериментов сформировался ряд выводов относительно особенностей решения поставленной обратной задачи. Вкратце они сводятся к следующему:

- в результате автоматизированного подбора от различных начальных приближений можно получить варианты решений с близкими значениями функции цели, но различающиеся особенностями подобранной конфигурации тела и характером приближения исходного и модельного полей;
- при однократном выполнении процедуры подбора в большинстве случаев не удается получить решение, обеспечивающее минимально возможное (в условиях решаемой задачи) расхождение наблюдаемого и теоретического полей. Для формирования каждого допустимого решения приходится прибегать к стратегии поэтапного улучшения вариантов – повторению процедуры минимизации с последовательной корректировкой начальных приближений в диалоговом режиме;
- несмотря на различные конфигурации частных решений, им присущи и общие свойства: хорошая сопоставимость положения центра тяжести тела и площади подобранных контуров сечений, а следовательно, и суммарной массы тела. Это соответствует известным положениям о высокой устойчивости восстановления интегральных характеристик объекта, выраженных через гармонические моменты нулевого и первого порядков.

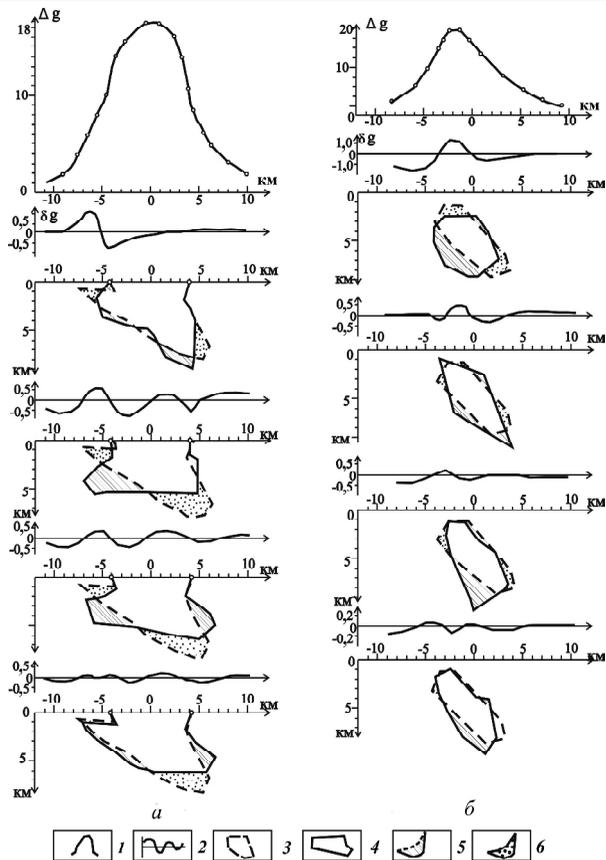


Рис. 1. Примеры проявления компенсационного взаимодействия: а – для модели интрузивного массива; б – для модели рудного объекта; 1 – исходное поле силы тяжести (Δg); 2 – графики невязок подобранных аномалий (δg); положение контуров: 3 – исходной модели, 4 – найденных решений; участки расположения фиктивных масс: 5 – с избытком, 6 – с недостатком масс

Особое внимание было уделено анализу природы неустойчивости решений. Выяснилось, что даже небольшие погрешности в исходной аномалии могут приводить к значительному отклонению подобранного контура тела от его исходного положения. Для хорошо подобранных вариантов (допустимых решений) наблюдается чередование участков, расположенных внутри и вне исходного положения контура (рис. 1).

На участках, где контур расположен вне гравитирующего тела, появляются избыточные (положительные) фиктивные источники, а там,

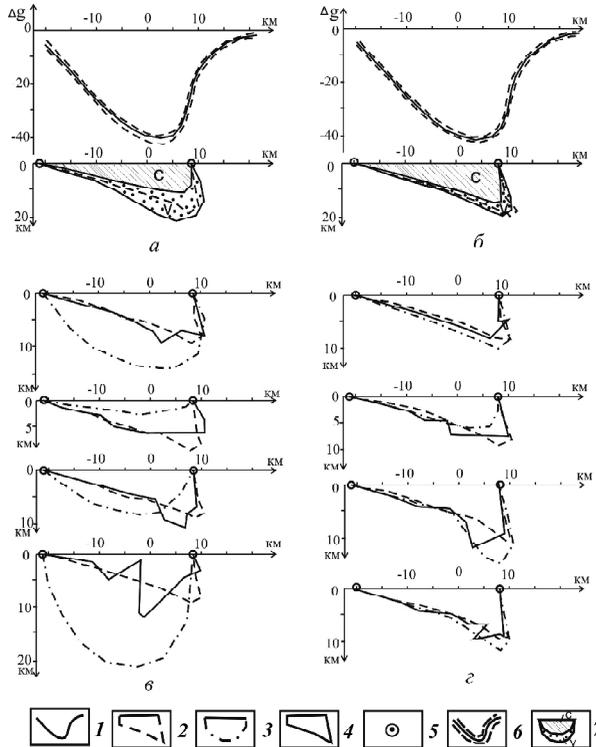


Рис. 2. Модель АД. Результаты поиска многовариантных решений. Структура обобщенной модели (а – на начальных этапах поиска, б – на завершающих этапах); в, з – варианты найденных решений; 1 – график исходной гравитационной аномалии; положение контура гравитирующего тела: 2 – точное, 3 – начальное приближение, 4 – полученное при автоматизированном подборе; 5 – положение закрепленных точек контура (верхней границы тела); 6 – граница коридора невязок подобранных (теоретических) аномалий; 7 – структура обобщенной модели: С – область инвариантности, V – зона вариаций

где он проходит внутри тела, возникает недостаток масс (отрицательные источники). Положительные и отрицательные фиктивные источники компенсируют влияние друг друга в порождаемом ими гравитационном поле таким образом, что невязки между исходной и теоретической аномалиями гораздо меньше, чем гравитирующий эффект от участков фиктивных масс. Это и объясняет причину неустойчивости решений обратной задачи. Указанную ситуацию можно рассматривать как проявление особой формы приближенной эквивалентности.

Такой тип приближенной эквивалентности, связанный с перераспределением масс внутри одного и того же тела (в отличие от эквивалентности разобобщенных объектов) вслед за В.Н. Страховым [6] будем называть эквивалентностью (неустойчивостью) за счет компенсационных эффектов. Иной характер неустойчивости связан с тем, что глубокозалегающие части гравитирующего тела не вносят ощутимый вклад в аномальное поле (их влияние соизмеримо с уровнем помех). В этом случае при автоматизированном подборе появляются выбросы угловых точек – “остроугольные” участки и участки самопересечения контура.

Масштаб проявления компенсационных эффектов определяется соотношением полезного сигнала и погрешностей исходных данных. Способность гравитирующих масс вступать в компенсационное взаимодействие (входить в состав той или иной компенсационной группы) зависит от их положения относительно центра тяжести объекта и его осей симметрии. Повышенной способностью к компенсации обладают массы расположенные в периферийных частях тела. Взаимно компенсирующие массы обычно находятся по разные стороны от центра тяжести и осей симметрии, например у верхней и нижней кромок, у правого и левого флангов, в висячем и лежащем боках тела и т.д. Компенсационные эффекты можно существенно уменьшить путем закрепления участков контуров тела, например положения его верхней кромки.

В каждом из нетождественных друг другу частных вариантов модели, полученных в результате автоматизированного подбора, компенсационные эффекты имеют свои особенности, соответственно каждый вариант характеризуется определенным приближением исходного поля. Тип компенсационных эффектов, который реализуется в процессе подбора, предопределяется заданным нулевым приближением и режимом минимизации. Поскольку выбор нулевых приближений и режимных констант при решении практических задач всегда несет в себе элементы случайности, то и выход на тот или иной вариант решения из числа возможных эквивалентов можно рассматривать (при однократном выполнении процедуры минимизации) как случайное событие.

Одним из основных аспектов решения обратной задачи с использованием автоматизированного подбора на ЭВМ является выбор подходящих начальных приближений. В процессе вычислительных экспериментов с теоретическими моделями анализировались различные стратегии выбора начальных приближений. С учетом специфики используе-

мых алгоритмов [2] и опыта решения практических задач для формирования начальных приближений оказалось целесообразным использовать подход, предусматривающий задание их в виде набора контуров, которые по-разному охватывают предполагаемую область локализации интерпретируемых источников либо вписываются внутрь нее (см. рис. 2). На начальных этапах построения модели форму контуров начальных приближений можно выбирать достаточно простой, и не требуется, чтобы они точно аппроксимировали структуру гравитирующего тела. Такой способ задания начальных приближений будем называть методом охватывающих контуров. Поиск допустимых решений предлагается проводить в процессе поэтапного улучшения вариантов. Благодаря монотонной сходимости используемых алгоритмов минимизации [2] любое решение, полученное в результате автоматизированного подбора, оказывается, по крайней мере, не хуже заданного начального приближения.

Вследствие действия компенсационных эффектов при интерпретации наблюдаемых аномалий зачастую не представляется возможным определить точное положение контура гравитирующего тела. Рассматриваемая задача содержит в себе элементы неопределенности; для оценки степени неопределенности ее целесообразно формулировать как задачу построения зоны минимальных размеров, в пределах которой может находиться контур гравитирующего тела.

Для управления процессом поиска многовариантных решений, анализа и обобщения содержащейся в них информации предлагается использовать особую графическую структуру, которая названа обобщенной моделью (рис. 2). В такой модели представлены две области: устойчивого определения гравитирующих масс (“область инвариантности”) и проявления компенсационных эффектов (“зона вариации” решений). Границы областей обобщенной модели изменяют свое положение в процессе многовариантного поиска – поэтапного улучшения найденных вариантов, их ответственности интерпретируемой аномалии и исходным данным.

1. Балк П.И. Обратные задачи гравиметрии как задача извлечения достоверной информации в условиях неопределенности / Балк П.И., Долгаль А.С. // Физика Земли. – 2012. – № 5. – С. 85–101.
2. Булах Е.Г. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий; программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации / Булах Е.Г., Зейгельман М.С., Корчагин И.Н. – Деп. в ВИНТИ 08.12.86, – № 8363 – В. Деп. – Киев, 1986. – 236 с.

3. *Булах Е.Г.* Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. – Киев: Наук. думка, 2010. – 463 с.
4. *Никонова Ф.И.* Интерпретация гравитационных аномалий на основе классов потенциалов, для которых обратная задача разрешима в конечном виде / Никонова Ф.И., Цирульский А.В. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 2. – С. 74–84.
5. *Старостенко В.И.* Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наук. думка, 1978. – 228 с.
6. *Страхов В.Н.* К вопросу о точности определения глубин залегания нижних кромок магнитоактивных тел / Страхов В.Н., Лапина М.И. // Магнитные аномалии земных глубин. – Киев: Наук. думка, 1970. – С. 157–166.
7. *Страхов В.Н.* К вопросу о единственности решения плоской обратной задачи теории потенциала // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1972. – № 2. – С. 38–48.

Задача визначення контура гравітуючого тіла. Методика пошуку багатоваріантних розв’язків оберненої задачі М.С. Зейгельман, Т.Л. Міхеєва, Н.В. Панченко

Розглянуто задачу визначення форми і глибинних меж гравітуючого тіла за полем сили тяжіння. У ході обчислювального експерименту з теоретичними моделями сформульовано положення, що стосуються особливостей розв’язків поставленої оберненої задачі, характеру прояву наближеної еквівалентності. Запропоновано технологію пошуку представницьких виборок розв’язків оберненої задачі.

Ключові слова: гравіметрія, обернена задача, автоматизований підбір, еквівалентні розв’язки, стійкі розв’язки, контур гравітуючого тіла.

The problem of recovery of the contour of the gravitating body. Methods of search of multivariate solutions to the inverse problem M.S. Zeygelman, T.L. Mikheeva, N.V. Panchenko

The problem of definition of the form and deep borders gravitating body on a field of a gravity is considered. During computing experiment with theoretical models a number of the positions concerning is formulated: features of the decision of the inverse problem, the nature of the manifestations of the approximate equivalence. The technology of search of representative sets of decisions of the inverse problem is offered.

Keywords: gravimetry, inverse problem, automated fitting, equivalent solutions, sustainable solution, the contour of the gravitating body.