

УДК 550.831

Аддитивные технологии локализации источников геопотенциальных полей

А.С. Долгаль

Горный институт Уральского отделения РАН
614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А. E-mail: dolgal@mi-perm.ru*(Статья поступила в редакцию 6 сентября 2019 г.)*

Представлен принципиально отличный от известных подход к решению обратных задач гравиразведки и магниторазведки рудного типа с использованием монтажного метода. Данный подход реализуется в аддитивных технологиях количественной интерпретации геопотенциальных полей. Основная идея заключается в том, чтобы на основе множества возможных вариантов интерпретации построить распределение некоторого параметра, ассоциирующегося с оценкой вероятности обнаружения источников поля во всех точках изучаемого геологического пространства, а затем использовать это распределение для выбора предполагаемого носителя аномалиеобразующих масс. Результаты интерпретационных построений представляются в виде «пакета информации», содержащего в себе обобщенную пространственно-статистическую характеристику аномалиеобразующих объектов и несколько частных решений обратной задачи, отвечающих различным критериям оптимальности.

Ключевые слова: *гравиразведка, магниторазведка, интерпретация, обратная задача, вероятность, модель.*

DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.380

Введение

Решение обратных задач гравиразведки и магниторазведки выполняется с целью локализации источников поля или, иначе, – с целью уточнения геологического строения изучаемого разреза (объема) среды. Частным случаем является определение формы, размеров и глубины залегания одного или нескольких возмущающих объектов, представляющих поисковый интерес (Долгаль, 2012). С позиций математической физики при этом используется некоторое правило (оператор), на основе которого значениям поля, полученным в результате геофизической съемки, должен соответствовать определенный набор параметров аномалиеобразующих тел, т.е. их физические свойства и геометрические характеристики. Получение геологически содержательных решений обратных задач геофизики на практике невозможно без привлечения априорной информации, т.е. нужно располагать хотя бы приблизительной информацией о моделируемых объектах.

Наиболее широко в настоящее время используются различные модификации метода подбора, в которых многократно корректируется предварительная схема геологическо-

го строения («стартовая модель»), в результате чего достигается необходимая степень близости наблюдаемого и модельного геофизических полей (Булах, 2010). Как правило, величина расхождения этих полей (невязка) должна быть сопоставима с точностью полевых измерений. «Стартовая модель» может корректироваться как в ручном, так и в автоматическом режимах. При этом, конечно, должны соблюдаться определенные ограничения, не позволяющие получать абсурдные, с точки зрения здравого смысла, результаты. Однако появление таких результатов в общем случае вполне возможно, т.к. обратные задачи (за исключением рассматриваемых в теоремах идеализированных ситуаций) не имеют единственного решения: одним и тем же значениям поля могут отвечать разные пространственные распределения источников. Кроме того, процесс корректировки модели всегда в той или иной мере осложняется неустойчивостью: малым изменениям подбираемых параметров могут отвечать большие изменения модельного поля и наоборот – значительным вариациям этого поля могут соответствовать незначительные изменения самой модели.

Выдающийся советский математик А.Н. Тихонов теоретически обосновал и практически обеспечил резкое снижение неустойчивости обратных задач за счет использования регуляризации. Вводятся и формализуются ограничения на искомые величины, которые затем непосредственно включаются в процесс решения задачи (Тихонов, Арсенин, 1979). На основе метода регуляризации созданы эффективные алгоритмы количественной интерпретации геофизических данных и реализующие их компьютерные технологии, получены важные геологические результаты, успешно используемые при прогнозировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых.

Конечным продуктом в методе подбора является модель геологического строения, удовлетворяющая всем имеющимся априорным представлениям и обеспечивающая требуемую величину невязки. С теоретической точки зрения – это квазирешение обратной задачи, т.е. набор параметров используемого модельного класса источников, при котором достигается наибольшая близость наблюденного и модельного полей. Существует классификация геоплотностных моделей, которая выделяет три основных типа пространственного распределения аномалиеобразующих масс: рудный, структурный и сложный. Далее будем рассматривать только обратные задачи рудного типа, в которых носителями масс являются конечные односвязные (попарно не пересекающиеся) объемы, т.е. геоплотностной разрез представлен совокупностью локальных аномалиеобразующих тел, находящихся в однородной по плотности вмещающей среде (Гравиразведка, 1990). Обратные задачи рудного типа принято считать наиболее простыми в теоретическом плане, т.к. в случае тел постоянной плотности существуют достаточно естественные классы тел, для которых при известной плотности гарантирована единственность решения обратной задачи (Принципы метода гравиметрии, 2011). Например, представим себе ситуацию, когда исследуемый геологический разрез представляет собой однородные по плотности горные породы, среди которых имеются 5 аномальных носителей масс в форме сравнительно неглубоко залегающих

кубиков. Но мы предполагаем, что это шарообразные тела и в результате решения обратной задачи в этом модельном классе локализуем в пространстве 5 шариков. Центры кубиков и шариков совпадают, массы тоже, получена новая информация о строении среды, однако в силу различия аномальных эффектов для разных по форме объектов невязка уменьшена быть не может.

Монтажный метод

Можно попытаться отойти от необходимости построения начальной модели геологического строения и ограничений, обусловленных выбором определенного модельного класса источников поля. Рассмотрим монтажный подход к решению обратной задачи гравиразведки в сеточных классах источников поля, предложенный в середине 1970-х гг. (Страхов, Лапина, 1976; Овчаренко, 1975) и получивший дальнейшее развитие в работах П.И. Балка (Балк, 2012, обзор). Монтажный подход базируется на методе конечных элементов, который используется для численного решения широкого круга задач механики твердого тела, теплообмена, гидродинамики и др. Изучаемый объем среды разбивается на соприкасающиеся между собой малые, по сравнению с размерами геологических тел, квадраты (в 3D вариант – кубы), из которых по определенным правилам «собираются» искомые аномалиеобразующие объекты. Для построения одного объекта достаточно задать местоположение единственного кубика (монтажного элемента), при этом не нужно вводить жестких ограничений на форму этого объекта. Важно то, что монтажный метод решения обратной задачи снимает проблему неустойчивости в ее классическом понимании, т.к. конечная размерность модели и природные ограничения на ее плотностные и геометрические параметры изначально приводят к компактному множеству возможных решений, а учет определенного объема априорной информации влечет за собой надежность решения поставленной геологической задачи.

Приведем простой пример, иллюстрирующий работу монтажного метода при моделировании призматического тела по

осложненному помехой гравитационному полю (рис. 1). В качестве начального приближения задается один монтажный элемент (центр кристаллизации), а также предполагается, что возмущающий объект является односвязным (не имеет пустот), обладает достаточно гладкой границей, его мощность не превосходит 1 км по латерали и 0.5 км по вертикали, а глубина погружения нижней кромки не превышает 1 км.

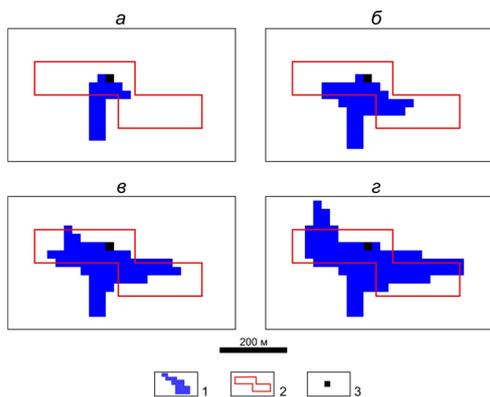


Рис. 1. Текущие приближения при моделировании одиночного объекта монтажным методом, полученные: а – после 20 итераций; б – после 40; в – после 60; г – после 88 (конечный результат интерпретации); 1 – подобранная модель; 2 – аномалиеобразующая призма; 3 – центр кристаллизации

Традиционно количественная интерпретация ограничивается построением единственного допустимого варианта интерпретационной модели, обеспечивающего требуемую величину невязки полей. В силу свойства неоднозначности обратной задачи можно построить несколько таких решений, а затем геофизик может выбрать наилучший из них без каких-либо формализованных критериев, на основе собственных экспертных оценок. В настоящее время стало возможным на базе высокопроизводительной компьютерной техники построить представительные множества Q допустимых вариантов решения обратной задачи. Каждый из этих вариантов обеспечивает сравнительно малое расхождение наблюдаемого и модельного полей и не противоречит имеющейся априорной информации.

Аддитивные технологии интерпретации

Аддитивные технологии – это принципиально отличный от известных подход к решению обратных задач гравиразведки (Балк, Долгаль, 2016). Основная идея заключается в том, чтобы на основе множества возможных вариантов интерпретации Q построить распределение некоторого параметра, ассоциирующегося с оценкой вероятности обнаружения источников поля в любой точке изучаемого геологического пространства, а затем «приложить» это распределение к каждой области, претендующей на роль истинного носителя аномалиеобразующих масс. Так осуществляется ранжирование отдельных фрагментов каждого модельного носителя по оценке вероятности обнаружения в них возмущающих масс.

Проиллюстрируем суть и возможности аддитивных технологий на примере 2D обратной задачи: аномалия гравитационного поля обусловлена тремя телами эффективной плотности $\sigma_1 = 0.15$, $\sigma_2 = 0.2$, $\sigma_3 = 0.3$ г/см³, а сами измерения выполнены с шагом 500 м на профиле длиной 40 км и осложнены слабой помехой (рис. 2). Можно провести аналогию между предложенной моделью плотностной среды и некими горизонтально протяженными интрузивными телами, залегающими в гравиактивном слое мощностью порядка 10 км. При разных положениях центра кристаллизации было построено 1182 допустимых решения обратной задачи, обеспечивающих среднее квадратическое расхождение наблюдаемого и модельного полей, не превышающее 0.1 мГал. Некоторое представление об их разбросе дает такой показатель: площадь области, покрываемой этими решениями, более чем в 2.5 раза превышает суммарную площадь истинных аномалиеобразующих тел.

На рис. 2 представлена вертикальная карта изолиний функции локализации f , характеризующей вероятность наличия источников в каждом элементарном фрагменте геологической среды (Шархимуллин, Долгаль, 2011). Как очевидно, имеет место наиболее ожидаемый, среднестатистический исход интерпретации: монтажные элементы, на которых вероятности достаточно высоки, действительно являются фрагментами истинных гравитирующих объектов.

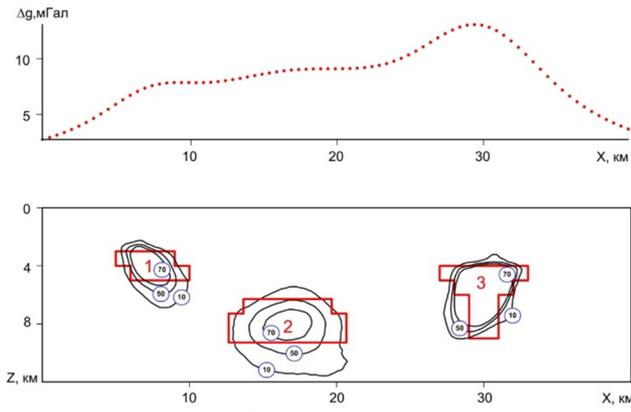


Рис. 2. Модельный пример: 1 – гравитационное поле; 2 – источники поля, их номера; 3 – изолинии функции локализации f , %

Однако нельзя считать представительными результаты интерпретации, в которых не даны предположительные границы изучаемых геологических тел – источников поля. Попытаемся выбрать «наилучший» вариант интерпретационных построений из множества Q , включающего в себя 1182 решения S обратной задачи. Рассмотрим два варианта: традиционный выбор решения S_1 по минимуму невязки подбора и выбор решения S_2 , отвечающего критерию Ω максимума апостериорной вероятности (Балк, Долгаль, 2017). Последнее означает, что сумма значений функции локализации f (т.е. вероятности), нормированная на число n монтажных элементов в данном решении $\Omega = \sum f/n$, будет наиболее высокой. Отчетливо видно, что решение S_2 , отвечающее критерию максимума апостериорной вероятности, лучшим образом осуществляет приближение истинного носителя масс S^* (рис. 3).

В дополнение к визуальной не мешает и количественная оценка этого преимущества. В качестве меры близости двух носителей S^* и S возьмем отношение площади μ общего фрагмента носителей S^* и S к площади области, точки которой принадлежат хотя бы одному из этих носителей:

$$\rho(S^*, S) = \frac{\mu(S^* \cap S)}{\mu(S^* \cup S)}$$

В идеализированной ситуации, когда носители S^* и S совпадают, значение ρ максимально и равно 1; если же S^* и S не имеют общих точек, то $\rho = 0$. В нашем примере

$\rho(S^*, S_2) = 0.55$ (площадь общего фрагмента составляет около 71%), тогда как 0.37 $\rho(S^*, S_1)$ (здесь эта площадь равна 54%).

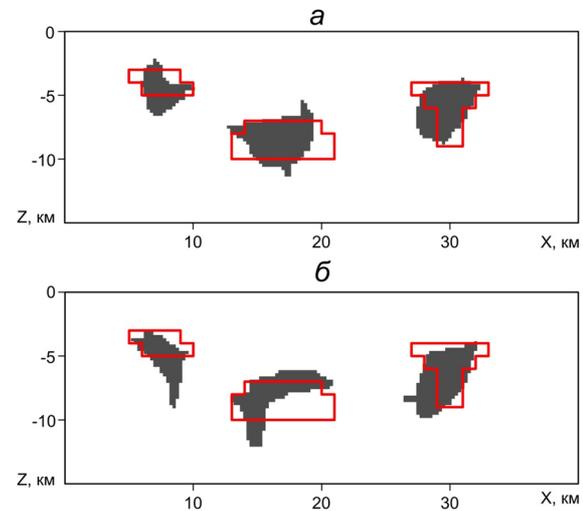


Рис. 3. Решения обратной задачи гравиразведки: а – решение, оптимальное по критерию Ω ; б – решение, оптимальное по критерию минимума невязки наблюдаемого и модельного полей

Если взять все множество найденных допустимых носителей, то по результатам проведенного численного эксперимента наблюдается довольно тесная связь между качеством решения ρ в целом и средним значением критерия Ω . Так, в нашем примере коэффициент корреляции между ρ и Ω по множеству из 1182 допустимых носителей составляет 0.75 (рис. 4). Для сравнения: коэффициент корреляции между значением ρ и величиной невязки составляет всего лишь 0.28.

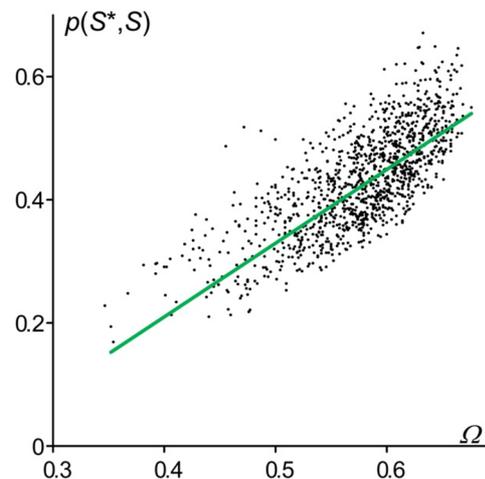


Рис. 4. Кросс-плот и линейная регрессионная зависимость $\rho = 1,195\Omega - 0,268$ (зеленая линия)

Факт наличия взаимосвязи между ρ и Ω очень важен и означает, что в практической ситуации (когда определить ρ невозможно), выбор решения обратной задачи, обладающего наиболее высокой величиной Ω , позволяет локализовать источники поля.

Заключение

Возросшая сложность геологических задач, решаемых с помощью гравиразведки, требует расширить объем и типы информации об источниках интерпретируемого поля, предоставляемой заказчику работ. Описанные в статье аддитивные технологии интерпретации гравитационных аномалий позволяют ранжировать отдельные фрагменты допустимых носителей по значению оценки вероятности наличия в них возмущающих масс. Достаточно информативным результатом интерпретации данных гравиразведки является «пакет информации», включающий в себя «интегральные» характеристики структуры множества Q (функция локализации f и т.п.) и некоторое число частных решений обратной задачи, отвечающих статистическим критериям оптимальности (максимум апостериорной вероятности Ω и т.п.). Необходимо отметить, что основное внимание в статье было уделено интерпретации данных гравиразведки, однако все основные теоретические положения и выводы очевидным образом распространяются на область магниторазведки. Исключение составляет оценка параметров источников интенсивных (более 5000 нТл) магнитных аномалий, обусловленных, в частности, железорудными залежами, при которой необходимо учитывать взаимное влияние магнитных объектов.

Библиографический список

Балк П.И. Монтажный подход В.Н. Страхова: история развития и современное состояние // Академик В.Н. Страхов. Геофизик и математик

/отв. редактор В.О. Михайлов; Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. М.: Наука, 2012. С. 37–46.

Балк П.И., Долгаль А.С. Аддитивные технологии количественной интерпретации гравитационных аномалий // Геофизика. 2016. № 1. С. 43–47.

Балк П.И., Долгаль А.С. Обратные задачи гравиразведки как проблема принятия решения в условиях неопределенности и риска // Физика Земли. 2017. №2. С. 45–61. doi: 10.7868/S0002333717020016

Булах Е.Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наук. думка, 2010. 463 с.

Гравиразведка: справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1990. 607 с.

Долгаль А.С. Совершенствование методов количественной интерпретации геопотенциальных полей // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. Вып. 4 (17). С. 47–55. DOI: 10.17072/psu.geol.12.4.47

Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф. Повышение точности интерпретации моногеничных гравитационных аномалий // Геоинформатика. 2011. №4. С. 49–56.

Кауфман А. А., Хансен Р. Принципы метода гравиметрии / пер. с англ. В. А. Ефремова и Т. А. Тимакиной. Тверь: Междунар. ассоц. «АИС», 2011. 359 с.

Овчаренко А.В. Подбор сечения двумерного тела по гравитационному полю // Вопросы нефтяной и рудной геофизики. Алма-Ата: Изд-во Казах. политехн. ин-та, 1975. Вып. 2. С. 71–75.

Страхов В.Н., Лапина М.И. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии // Доклады Академии наук. 1976. Т. 227, № 2. С. 344–347.

Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 283 с.

Шархимуллин А.Ф., Долгаль А.С. Использование «функции локализации» с целью определения параметров источника моногеничной аномалии силы тяжести // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. Вып. 4(13). С. 69–76. DOI: 10.17072/psu.geol.11.4.69

Additive Technologies of Localization of the Geopotential Field Sources

A.S. Dolgal

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
78A Siberian Str., Perm 614007, Russia. E-mail: dolgal@mi-perm.ru

A fundamentally novel approach for solving the inverse problems in gravity and magnetic ore prospecting using the assembly method is presented. This approach is implemented in additive technologies of quantitative interpretation of geopotential fields. The basic idea is to build a distribution of a certain parameter based on a set of possible interpretation options, associated with an estimate of the probability of detecting field sources at all points of the geological space under study. Then this distribution is used to select the assumed source of anomalous masses. The result of interpretation is presented in the form of a “package of information,” containing a generalized spatial-statistical characteristic of anomalous objects and several particular solutions of the inverse problem that meet various criteria of optimality.

Key words: *gravity exploration; magnetic exploration; interpretation; inverse problem; probability; model.*

References

- Balk P.I.* 2012. Montazhnyy podkhod V.N. Strakhova: istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyaniye [Assembly approach of V.N. Strakhov: history of development and actual state]. In: Akademik V.N. Strakhov. Geofizik i matematik. V.O, Mihaylov (Ed.). Inst. fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta RAN. Moskva, Nauka, pp. 37–46. (in Russian)
- Balk P.I., Dolgal A.S.* 2016. Additivnye tekhnologii kolichestvennoy interpretatsii gravitatsionnykh anomaliiy. Geofizika. 1:43–47. (in Russian)
- Balk P.I., Dolgal A.S.* 2017. Inverse problems of gravity prospecting as a decision-making problem under uncertainty and risk. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 53(P):214–229. doi: 10.1134/S106935131702001X
- Bulakh E.G.* 2010. Pryamyie i obratnyie zadachi gravimetrii i magnitometrii [Forward and inverse problems of gravity and magnetic]. Kiev, Naukova dumka, p. 464. (in Russian)
- Dolgal A.S.* 2012. Sovershenstvovanie metodov kolichestvennoy interpretatsii geopotentsialnykh poley [Development of methods of quantitative interpretation of geopotential fields]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 4(17):47–55. (in Russian)
- Gravirazvedka: Spravochnik geofizika* [Gravity prospecting: Handbook of geophysicist]. Mudretsova E.A., Veselova K.E. (Eds.). Moskva, 1990, p. 607. (in Russian)
- Dolgal A.S., Sharkhimullin A.F.* 2011. Povyshenie tochnosti interpretatsii monogenichnykh gravitatsionnykh anomaliiy [Improvement of accuracy of interpretation of the monogenic gravity anomalies]. *Geoinformatika*. 4:49–56. (in Russian)
- Ovcharenko A.V.* 1975. Podbor secheniya dvukhmernogo tela po gravitatsionnomu polyu [Selection of the cross-section of two-dimensional body on the gravity field]. *Voprosy neftyanoy i rudnoy geofiziki. Alma-Ata. Kazakh. politekhn. inst.*, 2:71–75. (in Russian)
- Kaufman A., Hansen R.* 2007. Principles of the gravitational method. Elsevier Science, p. 245.
- Sharkhimullin A.F., Dolgal A.S.* 2011. Ispol-zovanie «funktsii lokalizatsii» s tselyu opredeleniya parametrov istochnika monogenichnoy anomalii sily tyazhesti [Usage of “localization function” aimed to determination the parameters of source of monogenic gravity anomaly]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 4(13):69–76. (in Russian)
- Strakhov V.N., Lapina M.I.* 1976. Assembly method for solving the inverse problem of gravimetry. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 227(2):344–347. (in Russian)
- Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.* 1979. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving the incorrect problems]. Moskva, Nauka, p. 283. (in Russian)