

**СВЕТЛОЙ ПАМЯТИ ЕВГЕНИЯ ГЕОРГИЕВИЧА БУЛАХА ПОСВЯЩАЕТСЯ
“ГРАВИТАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ” – ПРАКТИКА, ОПЕРЕЖАЮЩАЯ ТЕОРИЮ?**

© А.С. Долгаль, А.Ф. Шархимуллин, 2009

*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия
Пермский государственный университет, Пермь, Россия*

This paper considers a number of questions, connected with “gravitational tomography” – a line in interpretation, aimed at getting space distribution of density in a studied volume of geological environment without using classical inverse problem methods of gravimetry. Examples of algorithms and interpreting schemata are given. An attempt of considering “gravitational tomography” from the positions of geoinage data processing theory is made. Directions of further research are offered.

“Сейчас между качественными и количественными методами может быть выделен определенный комплекс физико-математических методов, позволяющих извлечь информацию из аномалий гравитационного поля. Этим методам придается системный подход, и тогда формируется система методов качественного анализа гравитационного поля. Они базируются в основном на эвристических алгоритмах. Стоит задача оценки геологических параметров. При различных априорных данных получают набор параметров, характеризующий положение аномального объекта. Часто это многовариантные схемы”.

Е.Г. Булах, М.Н. Маркова, В.И. Тимошенко, П.Д. Бойко “Математическое обеспечение системы автоматизированной интерпретации гравитационных аномалий”, 1984 г.

Введение. Под томографией (от греч. *τομος* – ломать, *σлой* и *γραφο* – пишу, черчу, рисую) подразумевается метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством многократного его просвечивания в различных пересекающихся направлениях. По виду просвечивающего излучения различают томографию электромагнитную (рентгеновскую, гамма-томографию, ядерно-магнитно-резонансную), пучковую (протонную), а также ультразвуковую и пр. [1]. В геофизике широко используется сейсмическая томография – основной источник информации о глубинном строении Земли.

О “гравитационной томографии” впервые шла речь в работе Ю.Я. Ващилова [2], который в 1994 г. представил результаты послойного изучения “плотностной структуры земной коры и верхней мантии” на глубинах 20, 30, 40 и 60 км по Северо-Востоку России. Им был введен термин “гравиметрическая томография”. По мнению Ю.Я. Ващилова, “массовая интерпретация аномалий силы тяжести в классе трехмерных блоковых моделей источников возмущения позволяет получить величины относительных изменений плот-

ности в горизонтальном направлении” [2]. Однако сама идея послойного изучения пространственного распределения геоплотностных неоднородностей при интерпретации гравитационного поля была выдвинута значительно раньше.

В частности, во многих учебниках по гравитационным методам разведки приводятся глубинные характеристики трансформаций, по И.Г. Клущину, рассчитанные для точечной массы и предназначенные для приближенной оценки интервалов глубин размещения источников [3]. В 1980-х годах под руководством Е.Г. Булаха был разработан “томографический” по сути метод последовательного накопления и разрастания масс, позволяющий осуществлять построение геоплотностных разрезов и срезов изучаемого объема среды при минимуме априорной информации о возмущающих объектах [4]. Вынесенная в качестве эпиграфа к данной статье цитата из работы украинских ученых [5], написанной 25 лет назад, ярко характеризует многочисленные интерпретационные методы, получившие бурное развитие в начале XXI в. К таким методам относятся спектральный пространственный анализ (СПАН) [6], интерпретационная томография [7], частотная селекция [8], корреляционное зондирование [9], гравиметрическое зондирование [10], компенсирующая фильтрация [11], методы, основанные на аналитическом продолжении полей [12], способ послойного определения плотности [13], векторное сканирование [14], метод обратного оператора [15], метод вертикального градиента поверхностной плотности $\rho_z(x, y, z)$ [16] и др.

О термине “гравитационная томография”. Авторам статьи приходилось сталкиваться с мнением, что применительно к гравиметрии нельзя говорить о какой-либо томографии, так как отсутствуют внешние источники просвечивающего излучения [17]. Однако существует понятие эмиссионной томографии, которая базируется на

регистрации излучения, выходящего из активно-го объекта с некоторым пространственным распределением источников излучения [18]. При гравиметрических работах таким объектом является изучаемый объем геологической среды (вмещающие породы с нулевой избыточной плотностью в задачах “рудного” типа), а источники излучения – отдельные гравитирующие геологические тела, находящиеся внутри этого объема.

Алгоритмы гравитационной томографии. Таким образом, в настоящее время можно считать сформировавшимся новое “направление в теории интерпретации потенциальных полей, связанное с попытками изучения в некоторых частных случаях вертикального распределения намагниченности и плотности по данным магниторазведки и гравиразведки” [7]. Это направление получило название “гравитационная томография”, внутри которой выделяются два подхода – фильтрационный и аппроксимационный [7]. В первом случае тем или иным способом выделяются “разноглубинные” составляющие из наблюдаемого гравитационного поля, во втором – строятся пространственные распределения масс (плотностей) $\sigma = \sigma(x, y, z)$, в той или иной степени отражающие основные особенности структурно-тектонического строения изучаемого объема геологической среды.

К методам фильтрационной томографии относится векторное сканирование, реализованное в компьютерной технологии VECTOR, созданной в Горном институте УрО РАН под руководством В.М. Новоселицкого [19, 20]. На начальной стадии обработки по нерегулярной сети пунктов, распределенных в области $D: x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$, в которых проведены измерения анализируемого поля V , выполняется триангуляция – строится система многократно перекрывающихся треугольников, в центрах пересечения медиан которых устойчиво определяются значения ортогональных составляющих горизонтального градиента V_x и V_y . Затем осуществляются: векторное усреднение градиентов в скользящих окнах различного размера L^1, L^2, \dots, L^N , исключение фоновой составляющей поля (в случае необходимости); вычисление разностей V_x^k и V_y^k между градиентами исходного поля и их усредненными значениями; численное интегрирование полученных дискретных значений $V^k = \iint_D \mathbf{V}_s^k dx dy$, где $\mathbf{V}_s^k = \mathbf{V}_x^k + \mathbf{V}_y^k$ – вектор полного горизонтального градиента, $1 \leq k \leq N$.

Полученные результаты – составляющие поля V^1, V^2, \dots, V^N – отождествляются с аномальными эффектами, обусловленными объемами геологической среды, которые ограничены поверхностью Земли и некоторыми последовательно возрастающими эффективными глубинами $h_{\text{эф}}^1, h_{\text{эф}}^2, \dots, h_{\text{эф}}^N$. Соответственно, составляющая поля ΔV^k , обусловленная влиянием k -го горизонтального слоя с

кровлей, находящейся на глубине $h_{\text{эф}}^{k-1}$, и подошвой – на глубине $h_{\text{эф}}^k$, определяется выражением $\Delta V^k = V^k - V^{k-1}$. Поведение функции ΔV^k линейно связано с распределением плотности внутри рассматриваемого слоя, поэтому может использоваться с целью выделения и оконтуривания геологических объектов, расположенных в определенном интервале глубин. Существует возможность построения трехмерной диаграммы квазиплотностей $\sum_1^{N-1} \Delta V^k$ и различных ее сечений (разрезов, срезов и т. п.).

Эффективность технологии VECTOR подтверждена многочисленными результатами ее практического использования при решении широкого круга геологических задач, в том числе при поисках и разведке месторождений углеводородов [21].

Пример аппроксимационной томографии – технология разделения источников гравитационного поля по глубине, разработанная в Институте геофизики УрО РАН под руководством П.С. Мартышко [12]. Для выделения источников поля, локализованных между заданными глубинами, используется пересчет гравитационного поля в верхнее полупространство на различные уровни h . В первом приближении, после пересчета поля U на высоту h_1 , мы исключаем влияние источников, лежащих выше некоторой глубины h_1 . Соответственно, результаты пересчета поля на высоту h_2 ($h_2 > h_1$) не содержат влияния источников, лежащих выше глубины h_2 . Аномальный эффект горизонтального слоя горных пород, расположенного между глубинами h_1 и h_2 , отождествляется с разностью пересчитанных вверх и затем восстановленных на поверхности наблюдений полей $U_{h_1} - U_{h_2}$. При пересчете полей вниз используется метод регуляризации М.М. Лаврентьева, а влияние боковых источников приближенно определяется, как результат решения задачи Дирихле. Далее вычисляется распределение плотности в горизонтальном слое горных пород с заданными параметрами. Для этого выполняется решение линейной обратной задачи гравиметрии с применением квадратурной формулы Гаусса, что существенно снижает вычислительные затраты.

Практическое применение данной технологии при интерпретации материалов крупномасштабной гравиметрической съемки, выполненной в Соликамской впадине, позволило выявить зоны разуплотнения в слое горных пород с отметкой кровли $h_1 = 1$ км и подошвы $h_2 = 2$ км.

Примеры фильтрационной томографии. Приведем два примера, модельный и практический, иллюстрирующие возможности фильтрационной томографии [22–24].

На рис. 1 представлены результаты использования алгоритма, базирующегося на истокообразной аппроксимации, при котором гравитацион-

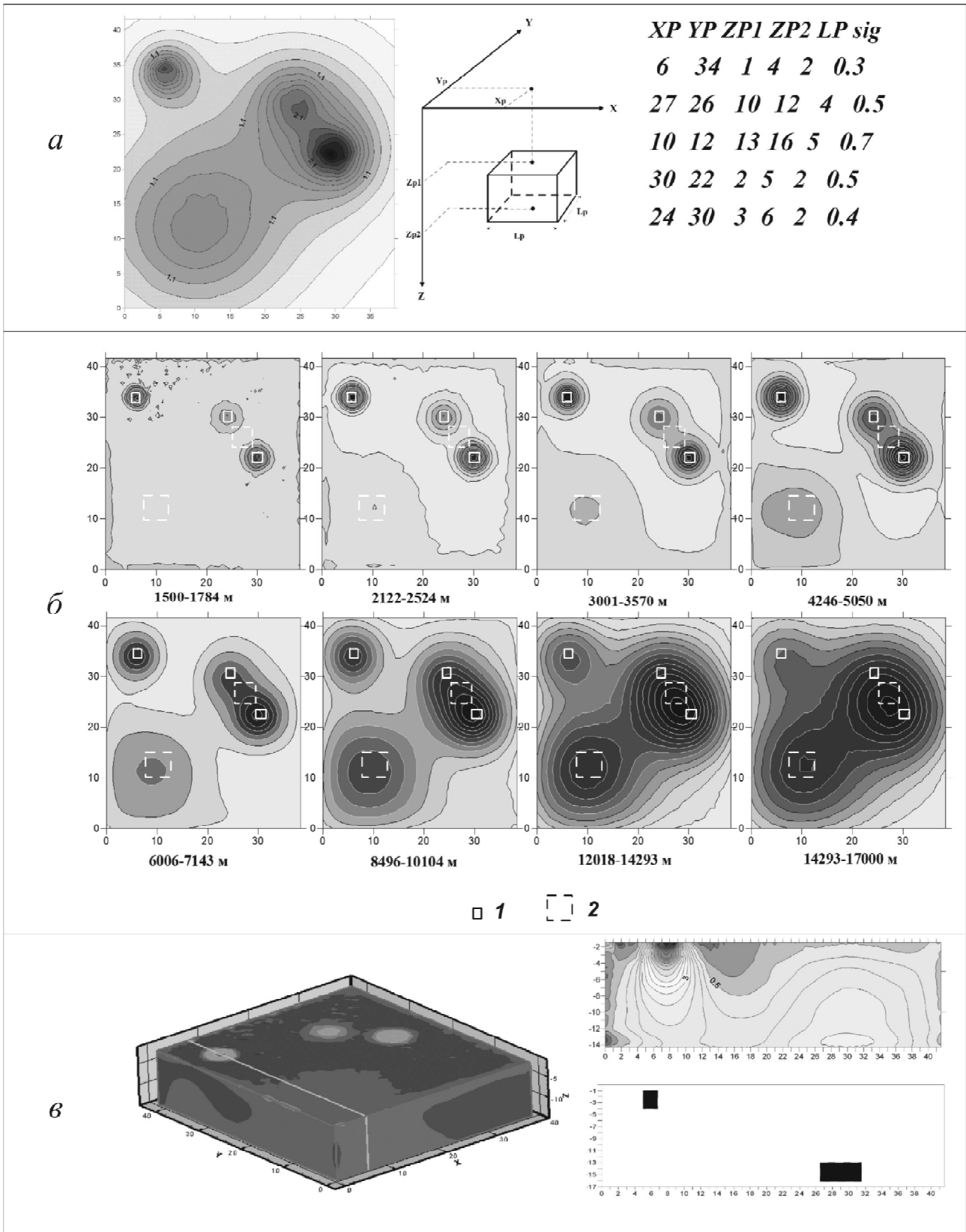


Рис. 1. Томографическая интерпретация гравитационного поля от набора призм: *a* – интерпретируемое гравитационное поле и характеристики его источников (XP , YP – координаты X и Y центра основания призмы, км; $ZP1$, $ZP2$ – глубины верхнего и нижнего оснований соответственно, км; sig – плотность, г/см³); *б* – горизонтальные срезы квазиплотностей на различных эффективных глубинах (указаны высоты пересчета поля h_1 и h_2 , м); *в* – трехмерная диаграмма и вертикальный разрез поля; 1, 2 – аномалиеобразующие объекты с глубиной залегания 1–3 (1) и 10–13 км (2)

ный эффект горизонтального слоя горных пород, расположенного между глубинами $H_{эф1}$ и $H_{эф2}$, отождествлялся с разностью пересчитанных вверх полей $\Delta g_{h1} - \Delta g_{h2}$ при $h_1 < h_2$ [22]. Как очевидно, набор горизонтальных срезов геологической среды вполне адекватно отражает исходную модель источников, состоящую из нескольких эшелонированных по глубинам прямоугольных призм [23].

Другой пример по Норильскому району иллюстрирует решение прогнозно-поисковых задач с использованием двух различных интерпретационных технологий. Первая из них состоит в выделении локальных гравитационных аномалий с использованием многоступенчатой технологии преобразования наблюдаемого поля при исключении влияния известных геологических объектов, регионального фона, негармонических помех и приведения данных к единой горизонтальной плоскости [24]. Во втором случае используется представленный выше алгоритм гравитационной томографии [22].

При рассмотрении рис. 2 можно сделать вывод о достаточно хорошем совпадении результативных построений, полученных с помощью фильтрационной томографии и рассмотренного выше подхода к интерпретации, включающего в себя весьма трудоемкие процедуры геологического редуцирования. Известные месторождения медно-никелево-платиновых руд (Талнахское, Норильск-I, Норильск-II, Черногорское и др.) в обоих случаях достаточно отчетливо фиксируются локальными аномалиями повышенных значе-

ний поля силы тяжести. При этом следует учесть тот факт, что, несмотря на то что рудоносные интрузии норильско-талнахского типа характеризуются повышенными значениями плотности (2,86–3,03 г/см³) и суммарной намагниченности (до 16 А/м) по отношению к вмещающим породам, выявить в наблюдаемых гравитационном Δg и магнитном (ΔT)_а полях аномальные эффекты от этих объектов крайне затруднительно.

Разрыв между теорией и практикой. Попытаемся перечислить основные особенности, присущие большинству методов гравитационной томографии, которые делают их привлекательными для геофизиков-интерпретаторов:

- 1) использование минимума априорной информации об источниках гравитационного поля;
- 2) отсутствие трудоемких процедур построения начального приближения, использующихся в классических методах автоматизированного подбора;
- 3) разделение интерпретируемого гравитационного поля на составляющие, предположительно обусловленные влиянием разноглубинных (не обязательно горизонтальных) слоев горных пород;
- 4) применение сравнительно быстрых вычислительных алгоритмов, допускающих обработку больших объемов исходной информации;
- 5) возможность построения различных вариантов пространственных распределений геоплотностных неоднородностей в исследуемом объеме среды;
- 6) широкий спектр способов визуализации результативных интерпретационных построений.

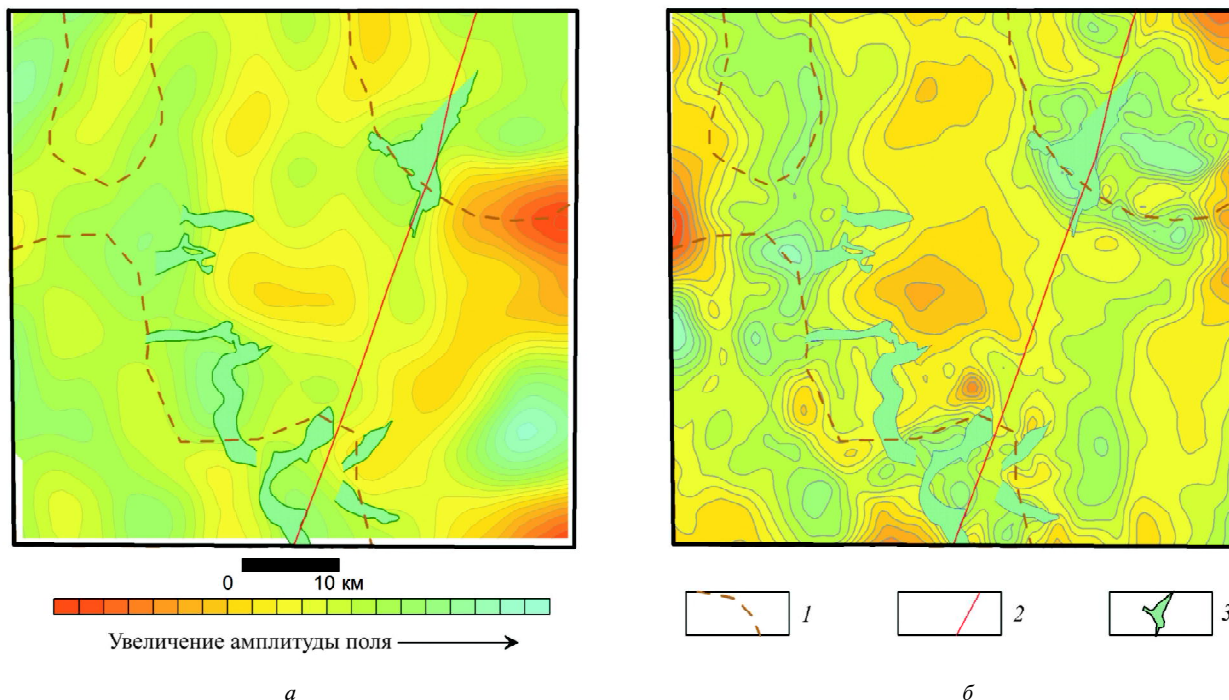


Рис. 2. Сопоставление результатов интерпретации аномалий поля силы тяжести, полученных с использованием различных технологий. Центральная часть Норильского района: *а* – результаты гравитационной томографии (аномалии от горизонтального слоя с эффективными глубинами 1–4 км); *б* – результаты традиционной технологии (локальные аномалии на уровне 750 м с предварительным геологическим редуцированием поля): 1 – границы трапповых мульд; 2 – Норильско-Хараелахский разлом; 3 – рудоносные интрузии

Однако с теоретических позиций все методы гравитационной томографии выглядят весьма уязвимо. Возможности любых алгоритмов фильтрации для оценки глубин залегания h аномалиеобразующих тел ограничены зависимостью спектральных характеристик гравитационного поля не только от h , но и от геометрических параметров источников.

Эквивалентность и неустойчивость решения обратной задачи гравиметрии в сеточном классе источников при отсутствии априорных ограничений на параметры неизбежно оказывают влияние на результаты аппроксимационной томографии.

Тем не менее с каждым годом появляется все больше примеров успешного решения разнообразных геологических задач на основе гравитационной томографии. В первую очередь стоит упомянуть о результатах, полученных ГНПП «Аэрогеофизика» при использовании пакета программ СИГМА-3D [25, 26]. В частности, в работе [7] указывается о том, что «применение интерпретационной томографии показало ее достаточно высокую эффективность в самых разнообразных геологических условиях: Московская синеклиза, Прикаспий, Полярный Урал, Западная Сибирь и т. д.»

Почему метод работает: несколько мнений. Таким образом, с одной стороны, имеются весьма интерес-

ные геологические результаты, полученные с использованием гравитационной томографии и подтвержденные данными бурения и других геофизических методов, с другой – теоретическая база этого подхода остается весьма слабой. Налицо определенное противоречие между теорией и практикой интерпретации в этом вопросе. Что же все-таки обеспечивает успех гравитационной томографии? Приведем лишь некоторые мнения по этому поводу.

П.С. Бабаянц с соавторами [7] предполагают, что достаточно крупные геологические объекты проявляются фрактальными множествами особых точек, что допускает локализацию главных особенностей даже при больших глубинах залегания.

С.Г. Бычков [21] высказывает мнение, что в результате применения технологии VECTOR также происходит локализация особых точек поля, местоположение которых в общем случае может не совпадать с местоположением аномалиеобразующего объекта. В его работе приводится модель контактной поверхности раздела двух сред, имеющей форму конхоиды Слюза, эквивалентной по гравитационному полю горизонтальному круговому цилиндру (рис. 3). В результате векторного сканирования поля локализуется полюс первого порядка – центр цилиндра, т. е. «граница раздела двух сред с различной плотностью, имеющая более пологую

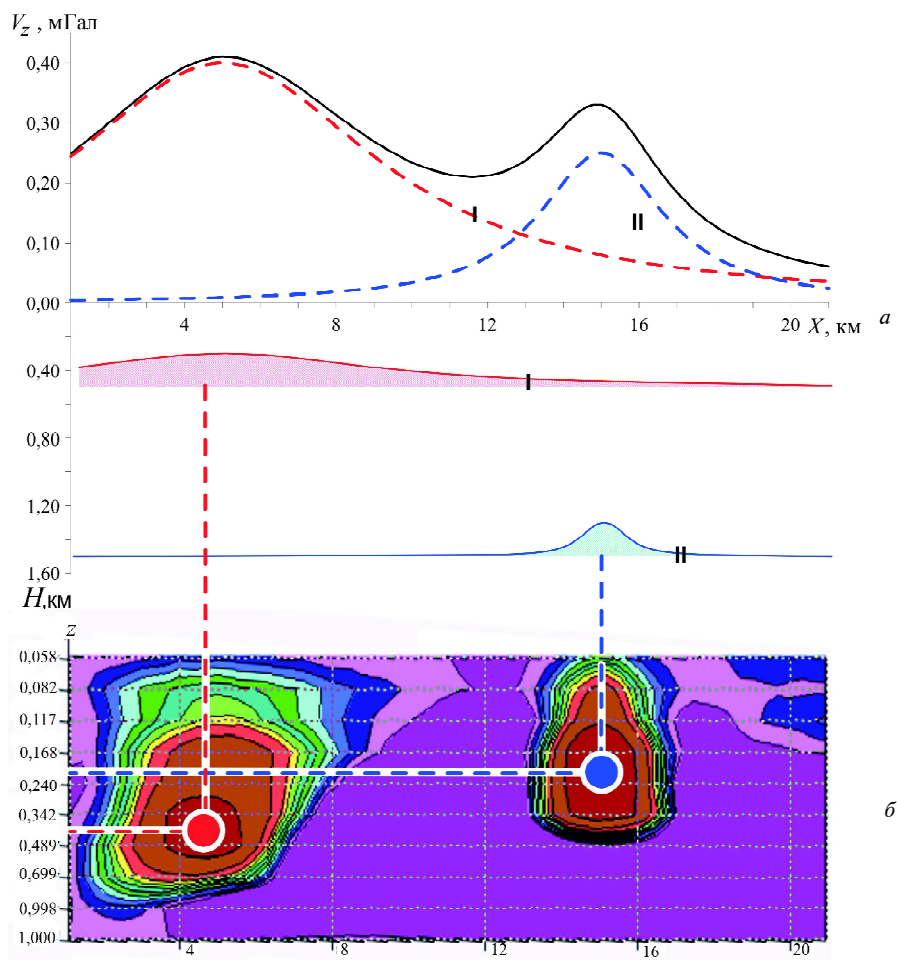


Рис. 3. Локализация источников поля в системе VECTOR (по С.Г. Бычкову): a – теоретическая модель и гравитационные эффекты контактных поверхностей; b – вертикальный срез гравитационного поля, построенный в системе VECTOR

форму и залегающая на меньшей глубине, отражается в системе VECTOR при больших коэффициентах трансформации, чем граница, залегающая на большей глубине, но имеющая крутые крылья". С целью повышения достоверности интерпретационных построений С.Г. Бычков предлагает оригинальную методику комплексирования технологии VECTOR и методов решения прямых и обратных задач гравиметрии [21].

А.М. Петрищевский считает, что формализованное решение обратной задачи в классе сферических тел, эквивалентных компактному источнику, при определении градиента поверхностной плотности μ_2 обеспечивает "возможность получения объемной информации о строении геологических сред без вспомогательных геолого-геофизических данных" [16].

К вопросу о теоретическом обосновании. В обобщенном виде при гравитационной томографии по некоторому числу N измерений гравитационного поля выполняется построение распределения плотности $\sigma = \sigma(x, y, z)$ или некоторой компоненты поля, отражающей это распределение, в kN точках пространства, где k – количество слоев в интерпретационной модели. Очевидно, что размерность вектора результатов превышает размерность вектора исходных данных, что, строго говоря, нарушает информационную корректность любого из используемых для этого "томографических" методов (в которых не предусматривается условие отбора необходимого решения из множества возможных, как, например, в двойственном методе решения линейной обратной задачи гравиметрии [27]). Поэтому в рамках классического детерминированного подхода к интерпретации в настоящее время не удается получить теоретическое обоснование гравитационной томографии. К изложенному следует добавить, что в связи с данной проблемой очень большой интерес представляют критические замечания и теоретические исследования А.В. Кобрунова, в которых рассматриваются локальные нарушения симметрии геологической среды [28].

Более благоприятные перспективы в теоретическом плане намечаются при использовании вероятностно-статистического подхода. Некоторые соображения по этому поводу представлены ниже.

В практике качественной интерпретации материалов гравиметрических съемок нередко говорят о так называемом эффекте больших территорий. Суть его заключается в том, что для выявления закономерностей связи гравитационных аномалий с особенностями геологического строения, т. е. для решения задач геокартирования, необходимы достаточно крупные (применительно к масштабу исследований) площади, обеспечивающие полный охват изучаемых элементов

структурно-тектонического строения с выходом за их пределы, в "нормальное поле".

В подавляющем большинстве случаев гравитационная томография используется при анализе достаточно большого количества наблюдений, в которых есть аномальные эффекты от разноранговых и разноглубинных геологических объектов, т. е. проявляется "эффект больших территорий". При этом пространственное распределение возмущающих объектов не является хаотичным, а в той или иной степени упорядочено по оси глубин, например: неоднородности осадочного чехла и кристаллического фундамента в платформенных областях; одно-, двух- и трехъярусное строение рудных районов; внутрикоровые и мантийные границы при глубинных исследованиях и т. п. Диапазон изменения размеров изучаемых геологических объектов в плане ограничен снизу масштабом исследований (мелкие объекты, не отвечающие сети наблюдений, становятся практически "невидимыми" либо создают некоторый уровень геологических помех), сверху – размерами площади исследований.

Использование частотной фильтрации (в явном или скрытом виде) при наличии указанных выше условий предположительно влечет за собой достоверное (не для отдельного тела, а для их совокупности в целом) отнесение возмущающих объектов к интервалам глубин их размещения. Попытку теоретического обоснования этого явления можно найти в работе А. Спектора и Ф. Гранта (Spector, Grant) [29], которые представили в ней результаты определения статистических характеристик аномалиеобразующих тел по энергетическому спектру магнитного поля.

Сходную с томографическими построениями физико-геологическую природу имеют результаты статистической оценки глубин залегания источников поля в скользящих окнах [30] и построения геологических границ по сглаженным результатам деконволюции Эйлера [31].

Гравитационная томография как процесс обработки геоизображений. Можно предложить еще одну гипотезу для объяснения "механизма" геологической эффективности гравитационной томографии. Возможно, при переходе к анализу больших объемов цифровой гравиметрической информации мы столкнулись с проявлением в интерпретационных построениях общих свойств генерализации геоизображений [32]. Известно, что при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) для получения информации о тектонических структурах, находящихся на различной глубине, используются космические снимки разного масштаба, а "уменьшение масштаба влечет за собой увеличение "глубинности" исследований" [32]. Выделяются различные виды генерализации: картографическая, дистанционная, динамическая и автоматическая (алгоритмическая).

В качестве исходных данных рассмотрим не результаты ДЗЗ, а гравитационное поле, его преобразования в процессе томографической инверсии – как один из видов алгоритмической генерализации. Для одной и той же территории анализ геоизображений разного масштаба “становится средством исследования геосистем разного порядка, выявления их пространственной иерархии” [32]. Проявление новой информации о петроплотностных характеристиках некоторого глубинного слоя горных пород есть простое следствие того, что “процесс генерализации ведет к перестройке всего графического образа” и позволяет “получать качественно новые сведения, обнаруживать качественно новые закономерности” [32].

Весьма важный, на наш взгляд, элемент гравитационной томографии – возможность представления результатов интерпретации в виде блок-диаграммы (трехмерного картографического рисунка). Возможности мозга человека ограничены и допускают одновременный анализ не более 5–6 картографических признаков. Блок-диаграмма, отражающая особенности распределения поля (или избыточной плотности) на 15–20 уровнях глубин, дает принципиально новую информацию, чем рассмотрение 15–20 отдельно построенных карт такого же содержания.

Кроме того, появилась возможность виртуального моделирования, т. е. блок-диаграммы программно управляемы: их можно разворачивать, наклонять относительно горизонта, строить сечения в различных плоскостях. Нельзя также не учитывать возможности изменения цветовой гаммы изображений, что позволяет подчеркивать те или иные их детали.

Интерпретационные модели, использующиеся в гравитационной томографии, представляют собой “непрерывное” пространственное распределение плотности $\sigma = \sigma(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, kN$ в изучаемом объеме геологической среды. При этом не выдвигаются априорных предположений о местоположении геологических границ (тел), выделение и оконтуривание которых выполняется уже после построения геоплотностной модели.

Ю.А. Косыгин предлагает следующую классификацию типов геологических границ, исходя из процедуры их выделения: резкостные (естественные); дизъюнктивные; условные 1–3 типов; произвольные. К условным границам 1 типа он относит “поверхности (линии, точки), на которых отдельные свойства из совокупности свойств, по которым формализовано пространство, принимают некоторые фиксированные значения” и, в частности, “изолинии, проводимые на магнитометрических и гравиметрических картах” [33]. С позиций геотектоники, подобное “апостериорное” проведение “геофизических” границ представляет собой, по-видимому, наиболее правильный подход.

После построения и визуализации геоплотностной модели возникает система картографических образов (КО), отражающих “реальную или абстрактную геоструктуру (геосистему), являющуюся ее прообразом” [32]. В процессе качественной интерпретации осуществляется распознавание КО, направленное на получение новой геологической информации о среде. Некоторая степень свободы при этом обеспечивается различными вариантами проведения границ 1-го типа внутри сеточной модели распределения плотностей $\sigma = \sigma(x_i, y_i, z_i)$. При этом определенные представления о геологическом строении у интерпретатора уже имеются.

Существует теория гештальта (нем. Gestalt – образ, форма, конфигурация), характеризующая зрительное восприятие информации, в соответствии с которой “структура образов обладает динамичностью и стремится к равновесному состоянию, четкости, выразительности и осмысленности”. Человеку свойственно восстанавливать скрытые (пропущенные) элементы КО, “дорисовывая” недостающие детали [32]. Таким образом, информация, считываемая с геоизображений, получаемых в результате гравитационной томографии, может оказаться существенно более содержательной, чем сведения о фиксированном местоположении геоплотностных границ, которые получаются в результате решения обратных задач гравиметрии в заранее выбранных модельных классах источников (“рудных”, “структурных” и т. п.).

Заключение. Развитие “томографического” подхода к интерпретации поля силы тяжести во многом обусловлено возросшими потребностями геофизической отрасли в оперативной интерпретации больших объемов цифровых данных и тесно связано с возросшими вычислительными возможностями компьютеров, а также новыми возможностями визуализации геоизображений. Авторы статьи не ставили перед собой задачу систематизации и тем более – теоретического обоснования методов гравитационной томографии, а лишь предприняли попытку осмысления причин того бесспорного факта, что эти методы в последние годы начали широко и успешно применяться при изучении глубинного строения Земли, геокартировании, поисках и разведке полезных ископаемых.

В дальнейшем, по нашему мнению, актуальным в области гравитационной томографии становится проведение исследований по следующим направлениям:

- теоретическое изучение возможностей разделения нескольких множеств разноглубинных объектов путем частотной фильтрации суммарного гравитационного поля при большом объеме анализируемой выборки;
- анализ процесса распознавания получаемых в результате гравитационной томографии КО с

позиций геоиконики — науки о геоизображениях;

- оценка возможностей тех или иных алгоритмов томографической интерпретации в заданных физико-геологических ситуациях путем имитационного моделирования и выполнения серии вычислительных экспериментов;
- создание методик, обеспечивающих эффективное комплексирование методов гравитационной томографии с другими методами интерпретации поля силы тяжести (в первую очередь — с решением обратных задач гравиметрии).

В частности, имеется опыт, свидетельствующий о целесообразности применения методов распознавания образов к серии “послойных” трансформант поля с целью выявления глубинных геофизических поисковых признаков рудных месторождений [34].

1. *Современная энциклопедия*: <http://www.dic.akademic.ru/nfsienclp/47866>.
2. *Ващилов Ю.А.* Гравиметрическая томография — новое направление изучения твердой оболочки Земли // Докл. РАН. — 1995. — **343**, № 4. — С. 532 — 536.
3. *Миронов В.С.* Курс гравиразведки. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Недра, 1980. — 543 с.
4. *Булах Е.Г., Левашов С.П.* Построение геоплотностных моделей методом последовательного накопления и разрастания аномальных масс // Изучение литосферы геофизическими методами (электромагнитные методы, геотермия, комплексная интерпретация). — Киев: Наук. думка, 1987. — С. 37—47.
5. *Булах Е.Г., Маркова М.Н., Тимошенко В.И., Бойко П.Д.* Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. — Киев: Наук. думка, 1984. — 112 с.
6. *Мавричев В.Г., Молодцов И.В., Петрова А.А и др.* Новые знания по новой технологии анализа потенциальных полей при прогнозе нефтегазоносности перспективных территорий // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 35-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. — Ухта, 2008. — С. 193 —194.
7. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.* Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ “СИГМА-3D” // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 31-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М.: ОИФЗ РАН, 2004. — С. 88—89.
8. *Довбнич М.М.* Опыт построения 3D плотностных моделей на основе частотной селекции гравитационного поля // Там же. — С. 24—25.
9. *Лебедев А.Н., Петров А.В.* Корреляционное зондирование геополей // Изв. вузов. — 2001. — № 3. — С. 27—36.
10. *Мусебов Н.И., Целомудрова М.И., Голева Р.В.* Методика глубинного гравиметрического зондирования и ее возможности в решении прогнозно-поисковых и эко-

логических задач // Геофиз. вестн. ЕАГО. — 2004. — № 10. — С. 9—12.

11. *Баньковский М.В., Полухтович Б.М., Гейхман А.М.* Изучение глубинного строения и перспектив нефтегазоносности восточной части Преддобруджинского прогиба и прилегающей акватории Черного моря по данным метода квазиэкстремумов квадратичного функционала // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 30-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. — М.: ОИФЗ РАН, 2003. — С. 17—18.
12. *Мартышко П.С., Новоселицкий В.М., Пруткин И.Л.* О разделении источников гравитационного поля по глубине // Вестн. Отделения наук о Земле РАН: электрон. науч.-информ. журн. www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2002/scpub-7.htm#begin.
13. *Подгорный В.Я.* Методика послойного определения плотности по гравитационным аномалиям на примере профиля Свободный — Комсомольск-на-Амуре — м. Сюркум // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 30-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М.: ОИФЗ РАН, 2003. — С. 96—98.
14. *Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П.* Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе “VECTOR” // Физика Земли. — 2006. — № 6. — С. 90—96.
15. *Овчаренко А.В.* Изучение плотностных неоднородностей по гравитационному полю методом обратного оператора // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 33-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. — Екатеринбург, 2006. — С. 260—264.
16. *Петрищевский А.М.* Первые приближения к гравитационной томографии: принципиальные подходы, методика и геологические результаты // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 30-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. — С. 255—258.
17. *Жирнов А.В.* О недостоверности метода вертикального гравитационного градиента μ_2 для исследования строения литосферы // Там же. — С. 122—125.
18. *Википедия*: <http://www.ru.wikipedia.org>.
19. *Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В.* Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий // Геофизика и математика. — М.: ИОФЗ РАН, 1999. — С. 104—107.
20. *Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Чадаев М.С. и др.* Основные технологии векторной обработки и интерпретации гравитационных и магнитных полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 28-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М.: ОИФЗ РАН, 2001. — С. 71—72.
21. *Бычков С.Г.* Современные технологии интерпретации гравиметрических данных при исследовании на нефть

- и газ // Нефтегаз. дело: электрон. науч. журн. – 2005. – http://www.ogbus.ru/authors/Vuchkov/Vuchkov_1.pdf, – 22 с.
22. Новоселицкий В.М., Долгаль А.С., Бычков С.Г. Новый алгоритмический базис технологии векторного сканирования геопотенциальных полей // Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов. Материалы Междунар. конф., посвящ. 50-летию Ин-та геофизики УрО РАН. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2008. – С. 183–186.
 23. Шархимуллин А.Ф. Развитие томографического подхода к интерпретации гравиметрических данных на основе истокообразной аппроксимации полей. Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. “Геофизика-2007” (школа молодых специалистов). – Санкт-Петербург, 2007. – С. 159–161.
 24. Долгаль А.С., Калинин Д.Ф., Олешкевич О.И., Симонов О.Н. Применение компьютерных технологий интерпретации геопотенциальных полей при прогнозировании платино-медно-никелевого оруденения // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 8. – С. 57–65.
 25. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Буш В.А., Трусов А.А. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений нефти и газа // Там же. – 2006. – № 5. – С. 13–18.
 26. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Зубов Е.И. и др. Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений твердых полезных ископаемых // Там же. – С. 18–27.
 27. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. – Киев: Наук. думка, 1978. – 227 с.
 28. Кобрунов А.И. О содержательных и эффективных моделях в гравиразведке // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 33-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. – Екатеринбург, 2006. – С. 136–141.
 29. Spector A., Grant F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. // *Geophysics*. – 1970. – **35**, № 2. – P. 293–302.
 30. *Гравиразведка: Справочник геофизика* // Под ред. Е.А. Мудрецовой, К.Е. Веселова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
 31. Reid A.B., Allsop J.M., Granser H. et al. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution // *Geophysics*. – 1990. – **55**, N 1. – P. 80–91.
 32. Берлянд А.М. Теория геоизображений. – М: ГЕОС, 2006. – 262 с.
 33. Косыгин Ю.А. Основы тектоники. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
 34. Долгаль А.С., Калинин Д.Ф. Глубинные геофизические поисковые критерии платино-медно-никелевого оруденения в пределах западного фаса Сибирской платформы // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Материалы XIV Междунар. конф. – Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. – Ч. 1. – С. 172–174.

Поступила в редакцию 06.03.2009 г.

А.С. Долгаль, А.Ф. Шархимуллин

“ГРАВИТАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ” – ПРАКТИКА, ОПЕРЕЖАЮЩАЯ ТЕОРИЮ?

Рассматриваются вопросы, связанные с “гравитационной томографией” – направлением в интерпретации, ориентированным на получение пространственного распределения плотности в изучаемом объеме геологической среды без использования классических методов решения обратных задач гравиметрии. Приводятся примеры алгоритмов и интерпретационных построений. Предпринята попытка рассмотрения “гравитационной томографии” с позиций теории обработки геоизображений. Намечены направления дальнейших исследований.

О.С. Долгаль, А.Ф. Шархимуллин

“ГРАВИТАЦІЙНА ТОМОГРАФІЯ” – ПРАКТИКА, ЩО ВИПЕРЕДЖАЄ ТЕОРІЮ?

Розглянуто питання, пов’язані із “гравітаційною томографією” – напрямом в інтерпретації, орієнтованим на отримання просторового розподілу густини у виучуваному об’ємі геологічного середовища без використання класичних методів розв’язку обернених задач гравіметрії. Наведено приклади алгоритмів та інтерпретаційних побудов. Зроблено спробу розгляду “гравітаційної томографії” з позицій теорії обробки геоізображень. Намічено напрями подальших досліджень.