

**ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ  
ГРАВИМЕТРИИ**

**(Рецензия на статью М.Д. Сидорова, Ю.П. Трухина  
«Глубинное строение и металлогенический потенциал южного фланга  
Кувалорогского интрузивного массива (Камчатка)»)**

© 2024 О.М. Муравина<sup>1</sup>, В.Н. Глазнев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, 184209;

e-mail: muravina@geol.vsu.ru

Поступила в редакцию 09.10.2024; после доработки 06.11.2024; принята в печать 25.12.2024

Технологии инверсии гравитационного поля, направленные на создание трехмерных детальных моделей реальной геологической среды, постоянно совершенствуются, но остаются неизменными базовые принципы решения обратных задач, нарушение которых не позволяет получить достоверный геологически содержательный результат. Методика формирования трехмерных плотностных моделей среды, представленная в рецензируемой статье, а также в других работах этих авторов вызывает ряд вопросов, из которых главным и принципиальным является корректность применения 2D плотностного моделирования при изучении трехмерного геологического объекта. Правомерность перехода от двумерных к трехмерным моделям нуждается в подтверждении имитационным моделированием. Отсутствие таких построений приводит к получению типичных «компенсационных» разрезов, неадекватных реальному распределению плотности. Другим аспектом является степень детальности полученной 3D модели среды, составленной по результатам 2D моделирования, которая, естественно, зависит от детальности исходного гравитационного поля. Качество и достоверность полученных результатов должны подтверждаться решением прямой 3D задачи гравиметрии от созданной модели среды.

*Ключевые слова:* трехмерное плотностное моделирование, гравитационное поле.

Статья М.Д. Сидорова и Ю.П. Трухина «Глубинное строение и металлогенический потенциал южного фланга Кувалорогского интрузивного массива (Камчатка)» знакомит читателей с результатами трехмерного плотностного моделирования на основе инверсии гравитационного поля, по которым затем делается вывод о металлогеническом потенциале объекта исследования. Поскольку решение задачи формирования геологически содержательных трехмерных моделей среды разной степени детальности входит в непосредственный круг наших интересов (Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2019, 2016; Муравина, 2016), а также в качестве рецензентов статьи М.Д. Сидорова и Ю.П. Трухина, мы с глубоким вниманием изучили материалы, представленные в статье, и познакомились с другими работами М.Д. Сидо-

рова с соавторами из списка цитируемой литературы в рецензируемой статье.

Главным и принципиальным является вопрос о корректности применения 2D плотностного моделирования при изучении трехмерного геологического объекта. Общеизвестно, что двумерные модели широко используются при интерпретации линейных аномалий, при этом подразумевается изучение объектов определенного класса, длина которых по простиранию, превышает их мощность не менее чем в 5 раз (Блох, 2009). Однако, как явствует из геологического описания, для области южного фланга интрузии Кувалорог, приведенного в рецензируемой статье, изучаемый геологический объект явно не двухмерный. Известно, что в методе подбора с использованием сеточных моделей хорошая аппроксимация поля не гарантирует

геологическую содержательность результирующей модели, из-за компенсационных эффектов и теоретически доказано, что минимум невязки достигается на проекциях гармонических функций на заданную сетку (Блох, 2009; Кобрунов, 2003; Оганесян и др. 1984; Страхов, 1984 и др.).

Правомерность перехода от двумерных к трехмерным моделям, тем более выполненного с помощью программного обеспечения с закрытым программным кодом, нуждается в подтверждении имитационным моделированием, которое является основным инструментом тестирования компьютерных технологий решения обратных задач геофизики (Страхов, 2005; Долгаль, Петросян, 2021). Это должна быть модельная интерпретация трехмерных аномалий (например, от нескольких шаров) с выполнением всей описываемой последовательности операций. Напомним, также, что деконволюция Эйлера дает корректные результаты только для 2D канонических моделей объектов!

Вероятно, отсутствие таких построений в работе М.Д. Сидорова и Ю.П. Трухина, привело к формированию типичных «компенсационных» разрезов, на которых почти каждой повышенной плотности вблизи поверхности, отвечает расположенная под ней область пониженной плотности на глубине. И наоборот: пониженная плотность на поверхности подстигается повышенной плотностью на глубине. Цитируемые авторы строят на этих особенностях некие геологические выводы, однако, подобное «компенсационное» распределение плотности во многом обусловлено спецификой использованной технологии интерпретации.

Важным аспектом является степень детальности полученной 3D модели среды, составленной по результатам 2D моделирования, которая, естественно, зависит от детальности исходного гравитационного поля: результаты должны быть согласованы с исходными данными шага съемки поля и его точности. В статье М.Д. Сидорова и Ю.П. Тру-

хина указано, что в качестве исходного поля, главным образом, были «использованы интерполированные карты аномалии Буге 2-х миллигальной гравиметрической съемки (м-б 1:200000)». На заключительной стадии плотностного моделирования авторы формально преобразуют двумерную модель в трехмерную, но фактически модель так и остается набором 2D разрезов, которые строились по отдельным профилям. При этом используется ячейка объема с ребром 0.1 км для всех глубин на разрезах.

Для оценки возможности выявления аномалий от объектов, соответствующих элементарному телу, мы подсчитали максимальный аномальный гравитационный эффект от элементарных кубов с различными параметрами (таблица).

Результаты расчетов показывают, что аномальный эффект от элементарного тела с размером ребра 0.1 км, расположенного на глубине большей 0.5 км, не превышает 0.01 мГал, что существенно ниже точности 2-х миллигальной гравиметрической съемки, данные которой были использованы авторами статьи в качестве исходных. Очевидно, что полученные М.Д. Сидоровым и Ю.П. Трухиным интерпретационные результаты не согласованы также и с исходной сеткой данных о поле: для карт масштаба 1:200000 шаг сетки, в лучшем случае, составляет 1 км. Естественно, несоответствие шага съемки и размеров сетки разбиения среды приводит к недостоверному представлению получаемых плотностных неоднородностей среды. Выявление объектов меньших по размеру, чем шаг съемки, а особенно на большой глубине (!), и создающих аномалию существенно меньшую по амплитуде, чем точность съемки, — представляется весьма неубедительным. Таким образом, утверждение М.Д. Сидорова и Ю.П. Трухина, что в работе построена объемная модель распределения плотности до глубины 5 км, — не представляется корректным. Интерполяция двумерных результативных плотностных моделей,

Максимальный аномальный гравитационный эффект от элементарного куба

Maximum anomalous gravitational effect from an elementary cube

$L$	$H = L/2$	$H = 0.5 \text{ км}$	$H = 1 \text{ км}$	$H = 5 \text{ км}$
0.1 км	0.87	0.01	< 0.01	< 0.01
0.2 км	1.73	0.11	0.03	< 0.01
0.3 км	2.6	0.36	0.09	< 0.01
0.4 км	3.47	0.83	0.21	0.01
0.5 км	4.33	1.57	0.42	0.02

Примечание.  $L$  — размер ребра элементарного куба;  $H$  — глубина залегания центра элементарного куба; цифры в ячейках — аномальные значения гравитационного эффекта над центром тела, в мГал.

Note. Symbols for the table:  $L$  is the size of the edge of the elementary cube;  $H$  is the depth of the center of the elementary cube; the numbers in the cells are the anomalous values of the gravitational effect above the center of the body, in mGal.

рассчитанных в условиях явного несоответствия требованиям двумерности изучаемой геологической среды, не позволяет говорить о построении достоверной плотностной объемной модели изучаемой интрузии.

В статье (Сидоров, Нурмухамедов, 2022, стр. 1439), в которой подробно описывается методика интерпретационных построений, цитируемые авторы отмечают, что «получаемое объемное изображение плотностных неоднородностей нельзя считать точным отражением гравитационного эффекта от 3D модели во всех точках исследуемого пространства. Однако данные такой объемной модели в дальнейшем могут служить основой первичных моделей из трехмерных тел и 3D моделирования по алгоритмам для подбора площадных измерений силы тяжести». То есть цитируемые авторы отдают себе отчет, что полученные ими 3D модели, можно использовать лишь в качестве стартовых в процедуре последующей трехмерной инверсии гравитационного поля. Именно так, например, поступает П.С. Мартышко с соавторами, когда на основании данных сейсмопрофилирования и пересчета скорости сейсмических волн в плотности строит стартовую 3D плотностную модель, в рамках которой затем выполняет решение обратной задачи (Мартышко и др. 2024, 2010, 2016, 2022) В случае профильных гравиметрических построений такой подход нам представляется наиболее корректным.

В статье М.Д. Сидорова и Ю.П. Трухина описывается детальная геологическая трактовка полученной модели, опирающаяся на весьма обширные геолого-геофизические данные по изучаемому объекту. Итогом таких построений является оценка металлогенического потенциала для объекта исследования, которая, на наш взгляд, может существенно измениться при условии корректных гравиметрических интерпретационных построений.

Технологии инверсии гравитационного поля, направленные на создание трехмерных детальных моделей реальной геологической среды постоянно совершенствуются, но остаются неизменными базовые принципы решения обратных задач (Страхов, 1999), нарушение которых не позволяет получить геологически содержательный результат. Качество и достоверность объемных модельных построений в каждом случае должны проверяться решением прямой 3D задачи гравиметрии от созданной модели среды.

#### Список литературы [References]

*Блох Ю. И.* Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. 2009. 232 с. <http://sigma3d.com/index.php/publications/books>. Дата обра-

щения 19.09.2024 г. [*Blokh Yu. I.* Interpretaciya gravitacionnykh i magnitnykh anomalij. 2009. 232 p. Date of application 09.19.2024 (in Russian)].

*Глазнев В.Н.* Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Изд-во: «КаэМ», 2003. 252 с. [*Glaznev V.N.* Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia. Apatity: Ed. «КаэМ». 2003. 252 p. (in Russian)].

*Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И., Муравина О.М. и др.* Строение верхней коры Елецкого участка Лосевского террейна (Воронежский кристаллический массив) по данным плотностного моделирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2019. № 3. С. 74–83 [*Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Muravina O.M. et al.* The structure of the upper crust of the Eletsy area of the Losevsky terrane (Voronezh crystalline massif) according to the data of density modeling // Vestnik of the Voronezh State University. Ser. Geology. 2019. № 3. P. 74–83 (in Russian)].

*Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М.* Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [*Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M.* Plotnostnoe modelirovanie central'noy chasti Vostochno-Evropeskoj platformy // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].

*Долгалъ А.С., Петросян Р.Н.* Решение обратной задачи гравиразведки для 2D призматических тел методом статистических испытаний // Вестник Пермского университета. Геология. 2021. Т. 20. № 4. С. 334–343 <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.4.334> [*Dolgal' A.S., Petrosyan R.N.* Reshenie obratnoj zadachi gravirazvedki dlya 2D prizmaticheskikh tel metodom statisticheskikh ispytaniy // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 2021. T. 20. № 4. P. 334–343. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.4.334> (in Russian)].

*Кобрунов А.И.* Теоретические основы решения обратных задач геофизики. Ухта: изд-во «УИИ», 1995. 226 с. [*Kobrunov A.I.* Teoreticheskie osnovy resheniya obratnykh zadach geofiziki. Ukhta: izd-vo «UII», 1995. 226 p. (in Russian)].

*Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Цидаев А.Г.* О построении сейсмоплотностных моделей земной коры // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Москва, 2024. С. 218–220 [*Martyshko P.S., Ladovskij I.V., Byzov D.D., Cidaev A.G.* O postroenii sejsmoplastnostny'x modelej zemnoj kory // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii gravitacionnykh, magnitnykh i elektricheskikh polej. 50-ya yubilejnaya sessiya Mezhdunarodnogo seminar im. D.G. Uspenskogo – V.N. Strakhova. Moskva, 2024. P. 218–220 (in Russian)].

*Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г.* Построение региональных геофизических моделей на основе комплексной интерпретации гравитационных и сейсмических данных // Физика Земли. 2010. № 11. С. 23–35 [*Martyshko P.S., Ladovskij I.V., Tsidaev A.G.* Construction of regional geophysical models based on the joint interpretation of gravity

- and seismic data // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth. Fizika Zemli*. 2010. V. 46. № 11. P. 931–942].
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В. и др.* Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2016. 94 с. [*Martyshko P.S., Ladovskij I.V., Fyodorova N.V. et al.* Teoriya i metody kompleksnoj interpretacii geofizicheskikh dannykh. Ekaterinburg: izd-vo UrO RAN, 2016. 94 p. (in Russian)].
- Мартышко П.С., Цидаев П.С., Колмогорова В.В. и др.* Скоростные и плотностные разрезы верхней части литосферы Североуральского сегмента // *Физика Земли*. 2022. № 3. С. 12–25. <https://doi.org/10.31857/S0002333722030048> [*Martyshko P.S., Tsidaev A.G., Kolmogorova V.V. et al.* Velocity and Density Cross Sections of the Upper Part of the Lithosphere within the North Urals Segment // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. V. 58. 3. P. 306–317. <https://doi.org/10.1134/S1069351322030041>].
- Муравина О.М.* Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2016. № 1. С. 108–114 [*Muravina O.M.* Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif // *Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology*. 2016. №. 1. P. 108–114 (in Russian)].
- Оганесян С.М., Старостенко В.И., Оганесян М.Г.* Двойственный метод решения линейных некорректных задач геофизики. Известия АН СССР, сер. Физика Земли, 1984, № 6, С. 64–78 [*Oganesyan S.M., Starostenko V.I., Oganesyan M.G.* Dvoystvennyy metod resheniya linejnykh nekorrektnykh zadach geofiziki. *Izv. AN SSSR, ser. Fizika Zemli*, 1984, № 6, P. 64–78 (in Russian)].
- Сидоров М.Д., Нурмухамедов А.Г.* Объемное изображение плотностной модели земной коры на примере южной Камчатки // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 10. С. 1433–1452. <https://doi.org/10.15372/GiG2021155> [*Sidorov M.D., Nurmukhamedov A.G.* Three-dimensional image of of crustal density model: a case study in South Kamchatka // *Russian Geology and Geophysics*. 2022. V. 63. № 10. P. 1189–1206. <https://doi.org/10.2113/RGG20204328>].
- Страхов В.Н.* Методы интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Пермь: изд-во «ПГУ», 1984. 72 с. [*Strakhov V.N.* Metody' interpretacii gravitacionnykh i magnitnykh anomalij. Perm: izd-vo «PGU», 1984. 72 p. (in Russian)].
- Страхов В.Н.* Три парадигмы в теории и практике интерпретации потенциальных полей (анализ прошлого и прогноз будущего). М.: изд-во ОИФЗ РАН, 1999. 78 с. [*Strakhov V.N.* Tri paradigmy v teorii i praktike interpretacii potencial'nykh poley (analiz proshlogo i prognoz budushchego). Moscow: izd-vo OIFZ RAN. 1999. 78 p. (in Russian)].
- Страхов В. Н.* Новое в геофизике и геоинформатике. М.: ИФЗ РАН, 2005. 133 с. [*Strakhov V.N.* Novoe v geofizike i geoinformatike. Moscow: IFZ RAN, 2005. 133 p. (in Russian)].

## THE PROBLEM OF CREATING THREE-DIMENSIONAL DENSITY MODELS OF GEOLOGICAL OBJECTS BASED ON SOLVING A TWO-DIMENSIONAL GRAVIMETRY PROBLEM

(Review of the article by M.D. Sidorov, Yu.P. Trukhin «Deep structure and metallogenic potential of the southern flank of the Kvalorogsky intrusive massif (Kamchatka)»)

O.M. Muravina<sup>1</sup>, V.N. Glaznev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018

<sup>2</sup>Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, 184209; e-mail: muravina@geol.vsu.ru

Received October 09, 2024; revised November, 02, 2024; accepted December 25, 2024

Gravitational field inversion technologies aimed at creating three-dimensional detailed models of the real geological environment are constantly being improved, but the basic principles of solving inverse problems remain unchanged, violation of which does not allow obtaining a geologically meaningful result. The method of forming three-dimensional density models of the environment, presented in the article by M.D. Sidorov and Yu.P. Trukhin, as well as in other works of the authors, raises a number of questions, of which the main and fundamental is the correctness of the application of 2D density modeling in the study of a three-dimensional geological object. The legality of the transition from two-dimensional to three-dimensional models needs to be confirmed by simulation modeling. The absence of such constructions leads to the production of typical «compensation» sections that are inadequate for the real density distribution. Another aspect is the degree of detail of the resulting 3D model of the environment, compiled from the results of 2D modeling, which, of course, depends on the detail of the initial gravitational field. The quality and reliability of the results obtained should be confirmed by solving the direct 3D gravimetry problem from the created model of the medium.

*Keywords:* three-dimensional density modeling, gravitational field.