

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЯ СИЛЫ
ТЯЖЕСТИ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Т.Л. Михеева, Е.П. Лапина, Н.В.Панченко, 2019

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Проведена качественная интерпретация исходных гравиметрических данных на основе использования автоматизированной системы интерпретации потенциальных полей. В процессе исследований решены следующие задачи: построена числовая модель аномального гравиметрического поля и выполнена качественная интерпретация полученных результатов, а также моделирование локальных аномалиеобразующих источников, Предложенный алгоритм позволяет существенно уменьшить количество искомых параметров и максимально приблизить решение к реальной геологической среде Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение апробировано на модельных примерах и реальных площадных гравиметрических данных.

Ключевые слова: качественная интерпретация, обратная задача, автоматизированная система, аналитическая аппроксимация, гравитационное поле, геологический объект.

Введение. Геологическая интерпретация гравиметрических данных занимает важное место в комплексе работ по обработке наблюдаемых геопотенциальных полей. На первом этапе обработки и интерпретации гравиметрических данных возникает целая серия вычислительных работ, которая должна решить задачи качественного анализа. В вычислительном процессе используются достаточно сложные алгоритмы, поэтому возникают значительные трудности в их реализации. Для облегчения решений большого комплекса задач можно использовать алгоритм построения аналитической модели аномального поля — по заданным значениям аномального поля строится аналитическая функция, которая с фиксированной точностью аппроксимирует данное поле. В обобщенном виде это можно изложить так. Исходное поле аппроксимируется полем некоторой модели. Ее следует описывать небольшим числом параметров, которые определяют местоположение и размеры возмущающих тел. Если аномальное поле обусловлено определенным количеством объектов, то аппроксимация должна дать возможность определить характеристики каждого тела. Функция должна отвечать принципам аппроксимационного подхода, предложенного В.Н. Страховым [15]. Аппроксимационная конструкция должна обеспечить эффективное решение прямой задачи и обладать способностью хорошо описать исходное аномальное поле.

Задача об аппроксимации исходного поля полем некоторой модели впервые была приведена М.С. Молоденским для задач геодезической гравиметрии [12] и А.К. Маловичко [9, 10] для задач гравиразведки. Этот метод развивали также В.И. Аронов, В.М. Гордин [1, 2], В.И. Старостенко [13, 14], А.С. Долгаль [8], Е.Г. Булах [7] и др.

Исходя из этого в данной статье представлены результаты исследования созданного в отделе математической геофизики алгоритмического и программного обеспечения построения аналитической модели исходного гравитационного поля в наперед выбранном модельном классе. Предложенный подход позволяет существенно уменьшить количество искомых параметров и максимально приблизить решение к реальной геологической среде.

Теоретические основы использованных алгоритмов интерпретации. Метод подбора часто используется в практике геологической интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных. Здесь наиболее полно можно учесть все априорные сведения о геологическом строении изучаемого района.

1. Задано поле $U_{исх}(x, y, z)$ или $U_{исх}(x, y)$. Под функцией $U_{исх}(x, y, z)$ будем понимать поле силы тяжести, его производные или специально построенные трансформанты. В заданном поле выбрано n наиболее характерных точек

$$U_{исх}(x_i, y_i, z_i) = U_{исх}(i), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

2. С помощью анализа наблюдаемого поля и всех априорных сведений о строении района выбирается начальная геологическая модель. С этого момента интерпретационная задача решается в выбранном модельном классе. Каждый класс описывается только ему соответствующей совокупностью параметров:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} \text{ или } P = \{p_j\}, \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Если построена модель и заданы ее параметры, то можно решить прямую задачу. Во внешних относительно аномалиеобразующих масс точках вычисляется теоретическое поле. Оно может быть по-

лучено и в тех точках, которые были ранее выбраны в массиве (1). В этом случае получим

$$U_t(x_i, y_i, z_i, P) = U_t(i, P), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Выражения (1) и (3) сопоставимы. В процессе решения модель постоянно изменяется путем варьирования численных значений ее параметров (2). Необходимо подобрать такие значения $\{p_j\}$, которые минимизируют невязки между функциями (1) и (3). В качестве решения интерпретационной задачи принимаем последовательность $P^* = \{p_j^*\}$ выражения (2), для которой невязка между исходным и теоретическим полями достигает минимума.

С одной стороны, известно только приближенное значение $U_{\text{вб}}^{\delta}$, с другой — геологическая модель почти никогда не отражает всей сложности строения геологических неоднородностей. Таким образом, невязка не может принять нулевого значения. Элемент P^* является квазирешением поставленной задачи.

3. Представленная аппроксимационная конструкция определяется набором трехмерных стержневых тел. Ориентация стержней согласована с координатными осями. Центр симметрии каждого тела может перемещаться. При решении задачи центры симметрии тел могут определять положение геометрических центров достаточно сложных фигур.

Трехстержневая аппроксимация дает возможность лучше описать интегральные характеристики геологической модели, о чем свидетельствуют многочисленные модельные расчеты, проведенные сотрудниками отдела математической геофизики.

В этом модельном классе решены прямая и обратная задачи гравиметрии и магнитометрии для двумерного (2D-) и трехмерного (3D-) вариантов исследований [3—6].

Трехмерная модель. Задано гравитационное поле

$$\Delta g_n(x_i, y_i, z_i) = \Delta g_n(i), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Выбрана прямоугольная система координат, ее начало расположено на земной поверхности, ось Oz направлена вертикально вниз, тогда плоскость xOy совпадает с земной поверхностью, если она горизонтальная. Исходное поле (4) представлено полем некоторой совокупности элементарных тел. Каждое тело состоит из трех пересекающихся взаимно перпендикулярных материальных стержней. Точка пересечения — центр симметрии

тела. Каждый стержень вытянут по направлению к координатной оси. Общая геологическая модель определена такой последовательностью параметров:

$$P = \left\{ m, (c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)_j \right\}, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

где m — количество элементарных тел; $(\tilde{n}_x, \tilde{n}_y, h)$ — центры тяжести тел; $(2t_x, 2t_y, 2t_z)$ — длины стержней, $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$ — избыточные плотности тел.

Выбранная аппроксимационная конструкция была использована при интерпретации данных площадной гравиметрической съемки в районе Карпат и Прикарпатья.

Практический пример. Вычисление поля, обусловленного аппроксимационной моделью — совокупностью стержней. Рассмотрим пример аппроксимации исходного поля силы тяжести аналитической функцией. Исследуемый участок расположен в районе Карпат и Предкарпатья размером 50×50 км. Необходимо аппроксимировать заданное поле силы тяжести в точках рельефа некоторой аналитической функцией. В качестве модели принята совокупность элементарных тел, каждое из которых описывается последовательностью параметров (5).

Площадь исследований равна 2500 км². Точки расположены по сети 2×2 км, т. е. в масштабе

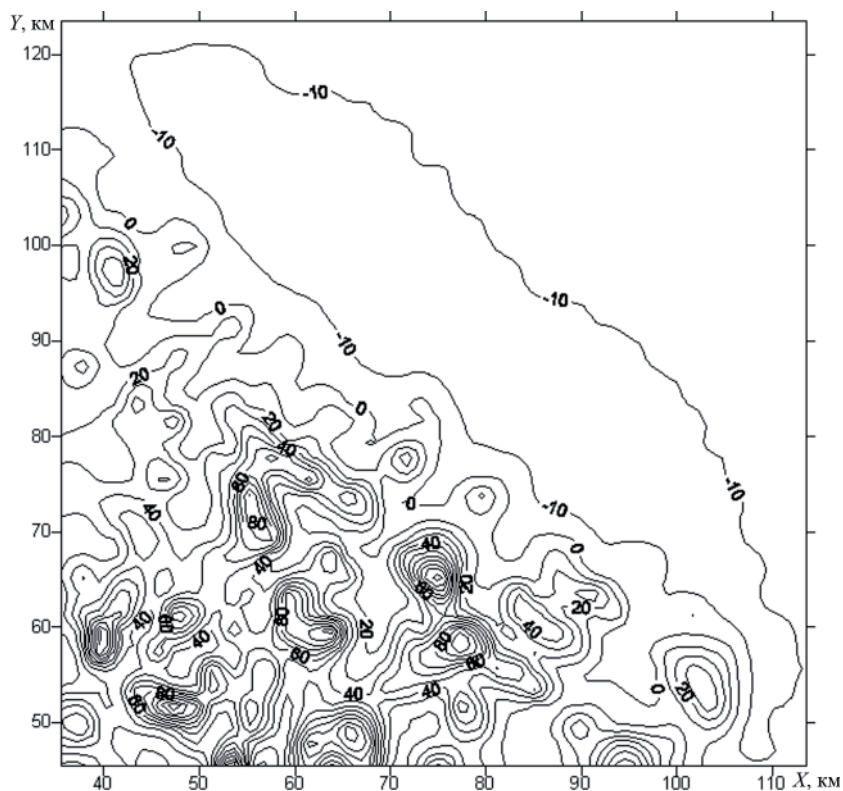


Рис. 1. Исходное поле силы тяжести Δg , мГал, пересчитанное на плоскость $Z=1400$ м

Fig. 1. The initial gravity field Δg , mGal, calculated on the plane $Z=1400$ m

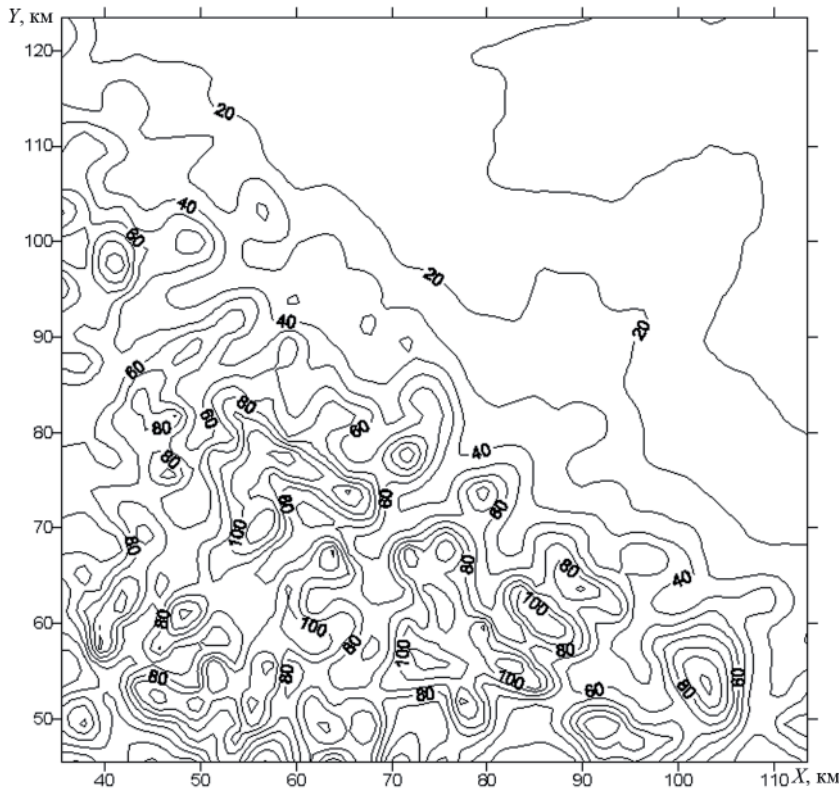


Рис. 2. Поле силы тяжести Δg , мГал, обусловленное влиянием масс рельефа
 Fig. 2. The gravity field Δg , mGal, due to the influence of the masses of the relief

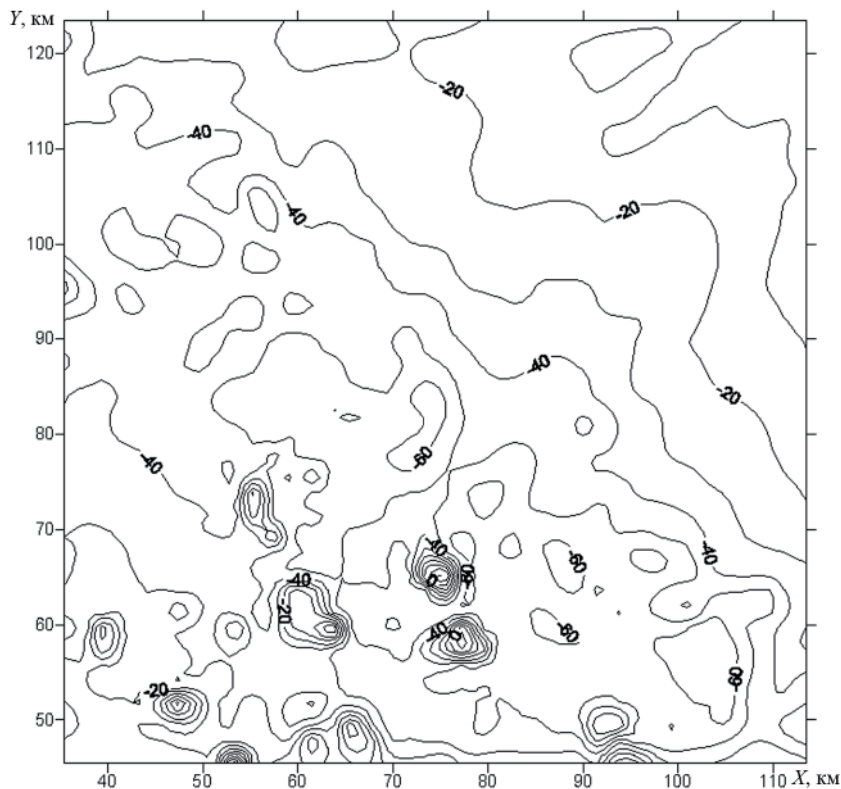


Рис. 3. Поле силы тяжести Δg , мГал, на плоской поверхности $H=1400$ м с учетом влияния масс рельефа земной поверхности
 Fig. 3. The gravity field Δg , mGal on a surface $H=1400$ m, taking into account the influence of the masses of the relief of the day surface

1:200 000. В качестве первого приближения выберем модель, которая представляет собой совокупность

рельефа (рис. 3). Это поле не содержит гравитационного влияния масс, слагающих рельеф земной

вертикальных материальных стержней [7]. Материальные стержни расположены равномерно на всей площади по сети 2×2 км. Центры тяжести этих возмущающих масс поместили на уровне моря, т. е. на глубине $Z=0$.

Для борьбы с эффектом овражности использован алгоритм подбора параметров модели по группам, в зависимости от их вклада в функционал. Максимальное расхождение между наблюдаемым и теоретическим полями составило 0,1 мГал. В результате получили модель, использование которой позволит аппроксимировать исходное поле в заданных точках рельефа с определенной точностью.

Имея аналитическую функцию и параметры модели, пересчитаем исходное поле на любую плоскую поверхность в верхнем или нижнем полупространстве. В данном случае пересчет был выполнен в верхнее полупространство на высоту 1 400 м — максимальная высотная точка рельефа на территории исследуемого района. На следующем этапе стоит задача учета исходного поля силы тяжести, обусловленного влиянием масс рельефа земной поверхности. Для этой цели используем ранее созданную в отделе математической геофизики программу вычисления масс рельефа. Решаем прямую задачу от контактной поверхности. Предполагаем, что аномальные массы залегают между контактной поверхностью, которая совпадает с рельефом и плоскостью высотой 255 м над уровнем моря — минимальной высотной отметкой рельефа для исследуемого района. Гравитационный эффект от этих масс вычислен на плоскости $Z=1400$ м. Построена карта поля силы тяжести, обусловленного рельефом местности (рис. 1).

Перейдем к следующему этапу: задано поле на плоскости $H=1400$ м и поле силы влияния масс рельефа земной поверхности на этой же высоте (рис. 2). Получаем разностное поле силы тяжести на плоской поверхности без учета влияния ре-

поверхности. Аппроксимируем поле совокупностью трехстержневых тел. Параметры тела определяются вектором (5), элементарные тела расположены по регулярной сети 2×2 км. Подбираем линейные массы стержней, их геометрические размеры и глубину залегания центра масс каждого тела. В процессе минимизации вычисления проведены в 625 точках. В результате подбора средняя невязка между заданным и теоретически вычисленным полями составила: $\delta = 0,005$ мГал. Таким образом, получена аналитическая модель, которая достаточно точно описывает заданное поле силы тяжести.

Построена апостериорная интерпретационная модель распределения плотностных неоднородностей, удовлетворяющая как наблюдаемому полю, так и априорной геологической информации.

Заключение. Рассмотренная постановка обратной задачи может быть использована для решения интерпретационных задач рудной геофизики. На основе решения обратной задачи произведена аналитическая аппроксимация исходного гравитационного поля полем модельных источников. По аномалиям силы тяжести нельзя изучать область разреза, в которой находится залежь, опуская изучение неоднородностей, находящихся на меньших глубинах. Поэтому детальность и точность решения задач прямо зависят от сложности геологического разреза. Последовательное исключение плотностных неоднородностей позволит получить аномальный эффект от области, включающей в себя аномальную залежь более точно. Если в аномальном поле этот эффект составляет небольшую часть, то в остаточном поле он может преобладать.

Дальнейшие исследования данного участка будут направлены на определение локальных эффектов и выделение границ области для проведения прямых поисков и постановки исследований другими геофизическими методами.

Список библиографических ссылок

1. Аронов В.И. Редуцирование аномалий силы тяжести в горной области на плоскость с помощью ЭВМ. Москва: ОНТИ ВИЭМС, 1965. 87 с.
2. Аронов В.И., Гордин В.М. Методы интерполяции геолого-геофизических характеристик на регулярную сеть. Экспресс-информация. Сер. Математ. методы исследования в геологии. Москва: ВИЭМС, 1973. Вып. 11/12. С. 20—32.
3. Булах Е.Г., Шиншин И.В. Алгоритмическое и программное решение задачи построения аналитической модели гравитационного поля поля. *Геофизический журнал*. 2000. Т. 22, № 2. С. 107—114.
4. Булах Е.Г., Шиншин И.В. Об аналитической аппроксимации исходного поля аномалии силы тяжести и его качественной интерпретации. *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 67—74.
5. Булах Е.Г., Лапина Е.П. К вопросу о построении аналитической модели внешнего магнитного поля. *Геофизический журнал*. 2008. Т. 30, № 2. С. 42—50.
6. Булах Е.Г., Михеева Т.Л. Прямые и обратные задачи магнитометрии в классе сложнопостроенных горизонтальных цилиндрических тел. *Геофизика*. 2009. № 5. С. 26—32.
7. Булах Е.Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наукова думка, 2010. 462 с.
8. Долгаль А.С. Аппроксимации геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач. *Геофизический журнал*. 1999. Т. 21, № 4. С. 71—80.
9. Маловичко А.К. Методы аналитического продолжения аномалий силы тяжести и их приложения к задачам гравиразведки. Москва: Гостоптехиздат, 1956. 160 с.
10. Маловичко А.К. Проблемы и задачи геодезической гравиметрии. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1958. 80 с.
11. Месторождения нефти и газа Казахстана: справочник; Э.С. Воцалевский, Б.М. Куадыков, З.Е. Булекбаев и др. Москва: Недра, 1993.
12. Молоденский М.С. Основные вопросы геодезической гравиметрии. *Труды ЦНИИГА и К*. 1945. Вып. 42. С. 3—107.
13. Старостенко В.И., Овруцкий И.Г. Регуляризирующий алгоритм построения числовой модели гравитационных полей. *Геофизический сборник АН УССР*. 1976. Вып. 74. С. 20—30.
14. Старостенко В.И., Бас Р.Г., Бутаков Г.С., Дядюра В.А. Автоматизированная система оперативной обработки данных гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наукова думка, 1972. 164 с.
15. Страхов В.Н. К проблеме параметризации в обратных задачах гравиметрии. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1978. № 6. С. 39—49.

Поступила в редакцию 5.11.2019 г.

ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОЛЯ СИЛИ ТЯЖІННЯ ПРИ ГЕОЛОГІЧНІЙ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ

Т.Л. Михеева, Є.П. Лапіна, Н.В. Панченко

Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, Київ, Україна

Проведено якісну інтерпретацію вихідних гравіметричних даних на підставі використання автоматизованої системи інтерпретації потенціальних полів. У процесі досліджень було розв'язано такі задачі: побудовано числову модель аномального гравіметричного поля та виконано якісну інтерпретацію отриманих результатів, а також моделювання локальних аномалієутворювальних джерел. Запропонований алгоритм дає змогу суттєво зменшити кількість шуканих параметрів і максимально наблизити розв'язок до реального геологічного сере-

довища, Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення випробувано на модельних прикладах і реальних площових гравіметричних даних.

Ключові слова: якісна інтерпретація, обернена задача, автоматизована система, аналітична апроксимація, гравітаційне поле, геологічний об'єкт.

THE PRACTICAL USE OF THE ANALYTICAL MODEL OF THE GRAVITATIONAL FIELD IN GEOLOGICAL INTERPRETATION

T.L. Mikheeva, E.P. Lapina, N.V. Panchenko

S.I. Subbotin Institute of geophysics NAN of Ukraine, Kiev, Ukraine

Purpose. To conduct a qualitative interpretation of the initial gravimetric data, an automated system for interpreting potential fields was used. During the research, the following tasks were solved: a numerical model of the anomalous gravimetric field was constructed and a qualitative interpretation of the results was obtained, local anomaly-forming sources were modeled. The proposed algorithm allows to significantly reduce the number of required parameters and to bring the solution as close as possible to a real geological environment. The developed software and algorithmic software has been tested on model examples and real areal gravimetric data.

Design/methodology/approach. Methods based on solving the inverse problem by the selection method, an approximation design is used, which is determined by a set of three-dimensional rod bodies. The orientation of the rods is consistent with the coordinate axes. The center of symmetry of each body can move. When solving the problem, the centers of symmetry of bodies can determine the positions of geometric centers of rather complex figures.

Three-core approximation makes it possible to better describe the integral characteristics of the geological model, as evidenced by the numerous model calculations carried out by employees of the department of mathematical geophysics. To combat the effect of ravine, an algorithm was used to select model parameters by groups, depending on their contribution to the functional. The maximum discrepancy between the observed and theoretical fields was 0,1 mGal. As a result, we obtained a model, the use of which will allow us to approximate the initial field at given points of the relief with a certain accuracy.

Findings. Results an example of approximation of the initial gravity field by an analytical function is considered. The study site is located in the Carpathian and Pre-Carpathian regions in size. The given gravity field at the relief points was approximated by some analytical function. As a result, an a posteriori interpretation model of the distribution of density inhomogeneities is obtained that satisfies both the observed field and a priori geological information. The sequential exclusion of density inhomogeneities makes it possible to obtain an anomalous effect from the region including the anomalous deposit more accurately. If in the anomalous field this effect is a small part, then in the residual field it can have a predominant value

The practical significance and conclusions. The considered formulation of the inverse problem can be used to solve the interpretation problems of ore geophysics. Based on gravity anomalies, it is impossible to study the section area in which the deposit is located, omitting the study of heterogeneities located at shallow depths. Therefore, the detail and accuracy of solving problems are directly dependent on the complexity of the geological section. Further studies of this area will be aimed at determining local effects and identifying the boundaries of the region for direct searches and research using other geophysical methods

Key words: quality interpretation, inverse problem, automated system, analytical approximation, the gravimetric field, geological object

References

1. Aronov V.I. The reduction of gravity anomalies in the mountainous region to the plane using a computer. Moscow: ONTI VIEMS, 1965. 87 p.
2. Aronov V.I., Gordin V. M. Methods of interpolation of geological and geophysical characteristics on a regular network // Express information. Ser. Math. research methods in geology/ Moscow: VIEMS, 1973. Vol. 11/12. P. 20–32.
3. Bulakh E.G. Algorithmic and software solution to the problem of constructing an analytical model of the gravitational field of the field. *Geophysical Journal*. 2000. Vol. 22, N 2. P. 107–114.
4. Bulakh E.G. On the analytical approximation of the initial field of gravity anomaly and its qualitative interpretation. *Physics of the Earth*. 2002. N 4. P. 67–74.
5. Bulakh E.G. To the question of constructing an analytical model of an external magnetic field. *Geophysical Journal*. 2008. Vol. 30, N 2. P. 42–50.
6. Bulakh E.G. Direct and inverse problems of magnetometry in the class of complexly constructed horizontal cylindrical bodies. *Geophysics*. 2009, N 5. P. 26–32.
7. Bulakh E.G. Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry. Kyiv: *Naukova Dumka*, 2010. 462 p.
8. Dolgal A.S. Approximations of geopotential fields by equivalent sources for solving practical problems. *Geophysical Journal*. 1999. Vol. 21, N 4. P. 71–80.
9. Malovichko A.K. Methods of analytic continuation of gravity anomalies and their applications to gravity exploration problems Moscow: *Gostoptekhizdat*, 1956. 160 p.

10. Malovichko A.K. Problems and tasks of geodetic gravimetry. Perm: Publishing house in Perms. Un-ta, 1958. 80 p.
11. Oil and gas fields of Kazakhstan: Reference book / E.S. Votsalevsky, B.M. Kuadykov, Z.E. Bulekbaev et al. Moscow: Nedra, 1993.
12. Molodensky M.S. The main issues of geodetic gravimetry // Tr. TsNIIGA and K. 1945. Vol. 42. P. 3—107.
13. Starostenko V.I., Ovrutsky I.G. The regularizing algorithm for constructing a numerical model of gravitational fields. Geophysis. Sat USSR Academy of Sciences, 1976. Vol. 74. P. 20—30.
14. Starostenko V.I., Bas R.G., Butakov G.S., Dyadyura V.A. Automated system for the operational processing of gravimetry and magnetometry data. Kiev: Science. Dumka, 1972. 164 p.
15. Strakhov V.N. On the parameterization problem in inverse problems of gravimetry. Izv. USSR Academy of Sciences. Earth physics. 1978. N 6. P. 39—49.

Received 5/11/2019