

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА

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

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина, e-mail: mtat@ukr.net, Lapina_Lena@ukr.net, panchenkov@ukr.net

Изучены возможности применения автоматизированного программного комплекса интерпретации гравитационных и магнитных полей для реализации количественной интерпретации практических данных. Предложенная аппроксимационная конструкция предоставляет интерпретатору широкие возможности при моделировании объектов сложной формы, определении геометрических и физических параметров магнитовозмущающих источников. Вычислительный эксперимент проведен с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. Программный комплекс дает возможность получать многовариантные решения и легко реализовывать принцип последовательного усложнения и уточнения модели в процессе решения задач моделирования. В качестве аппроксимирующей конструкции применялось несколько классов тел — фундаментальных форм для интерпретации (односвязный контур, звездное тело), которые использовались в качестве аппроксимирующих ячеек для описания геологических объектов при интерпретации наблюдаемых аномалий. Во Второй Украинской морской антарктической экспедиции в заливе Брансфилд при отработке методических вопросов моделирования аномальных магнитных объектов применена разработанная технология аппроксимации их сложными контурами. При интерпретации магнитометрических данных решать конкретные практические задачи целесообразно с использованием методики последовательного усложнения модели изучаемого объекта. Выполненные вычисления дают веские основания утверждать, что высокоинтенсивные аномалии в начале галса 0704 обусловлены магнитовозмущающими источниками с более высокими значениями намагниченности.

Ключевые слова: обратная задача, аппроксимационная конструкция, магнитное поле, геологический объект, интенсивность намагничивания, цилиндрическая ячейка с многоугольным сечением, звездное тело, интерпретация.

Введение. Современное состояние теории интерпретации геофизических данных при достаточно высоком уровне ее развития, как известно из работ В.И. Старостенко [10, 11], В.Н. Страхова [12], А.И. Кобрунова [7], Е.Г. Булаха [4, 6], А.С. Долгала [2], Ю.И. Блоха [3], В.И. Андреева [1], П.И. Балка [2] и многих других исследователей, характеризуется неполной адекватностью реальной геологической практики. Для обеспечения содержательной количественной интерпретации одним из основных условий или требований является выбор соответствующей параметризации изучаемого объекта среды, формирование модельных физико-геологических представлений геосреды. Уточнение имеющихся модельных представлений выполняется с применением современных компьютерных технологий, позволяющих проводить построение и визуализацию интерпретационных моделей.

В статье представлены результаты применения разработанной в отделе математической геофизики компьютерной технологии для реализации количественной интерпретации практических данных [8, 9], полученных во Второй Украинской морской антарктической экспедиции в проливе Брансфилд.

Теоретические основы использованных алгоритмов интерпретации. Предложенная компьютерная технология позволяет реализовать совместный под-

бор параметров аппроксимирующей конструкции по компонентам и гравитационного поля Δg , и магнитного поля $\Delta Z(\Delta T)$ одновременно, а также по каждой из них отдельно [4].

При проведении морских магнитометрических работ для исключения из результатов магнитометрических наблюдений переменных составляющих магнитного поля Земли (МПЗ) — геомагнитных вариаций — используют дифференциальные магнитометры, которыми осуществляется синхронное (одновременное) измерение значений модуля вектора напряженности магнитного поля $T(l)$ и $T(l + \Delta l)$ в точках, разнесенных на некоторое фиксированное расстояние (базу) Δl по курсу движения судна, с последующим вычислением составляющей градиента в направлении базы по приближенной (конечно-разностной) формуле

$$\frac{\partial T}{\partial l} = \frac{T(l + \Delta l) - T(l)}{\Delta l}.$$

Используемая в программном обеспечении аппроксимационная конструкция для параметризации источников гравитационных и магнитных аномалий позволяет пользователю одновременно задействовать несколько модификаций элементарных аппроксимирующих ячеек.

1. Вертикальная цилиндрическая ячейка с многоугольным сечением в горизонтальной плоскости описывается последовательностью параметров

$$P1 = \{I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_1, z_1, x_2, z_2, \dots, x_N, z_N\},$$

где I_x, I_y, I_z — составляющие вектора интенсивности намагничивания по осям O_x, O_y, O_z ; y_1, y_2 — координаты тела по простираанию; x_i, z_i — координаты угловых точек аппроксимирующих контуров в разрезе; N — количество угловых точек (сторон) многогранника [4].

2. Аппроксимационная ячейка представлена звездным телом [5]. Каждый источник магнитного поля описан последовательностью параметров

$$P2 = \{I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_0, z_0, m_i, R_0, A_1, B_1, \dots, A_N, B_N\},$$

где I_x, I_y, I_z — составляющие вектора интенсивности намагничивания по осям O_x, O_y, O_z ; y_1, y_2 — координаты тела по простираанию; x_0, z_0 — координаты центра тяжести звездного тела; m_i — размерность радиуса-вектора, описывающего контур звездного тела (количество точек на контуре); R_0 — начальное

значение радиуса-вектора; A_N, B_N — коэффициенты членов аппроксимирующего ряда, N — количество членов усеченного тригонометрического ряда:

$$R(\varphi_i) = R_0 + \sum_{j=1}^N A_j \cos j\varphi_i + B_j \sin j\varphi_i.$$

Для решения обратной задачи успешно применяется итерационный метод автоматизированного подбора.

Предложенная аппроксимационная конструкция предоставляет интерпретатору широкие возможности при моделировании объектов сложной формы. С одной стороны, с ее помощью достаточно удобно параметризовать возмущающие источники со сложным распределением физических свойств, с другой — легко реализуется стратегия подбора с последовательным усложнением модели при переходе от использования простых аппроксимирующих ячеек к более сложным.

Практический пример решения обратной задачи магнитометрии. Во Второй Украинской морской антарктической экспедиции в заливе Брансфилд

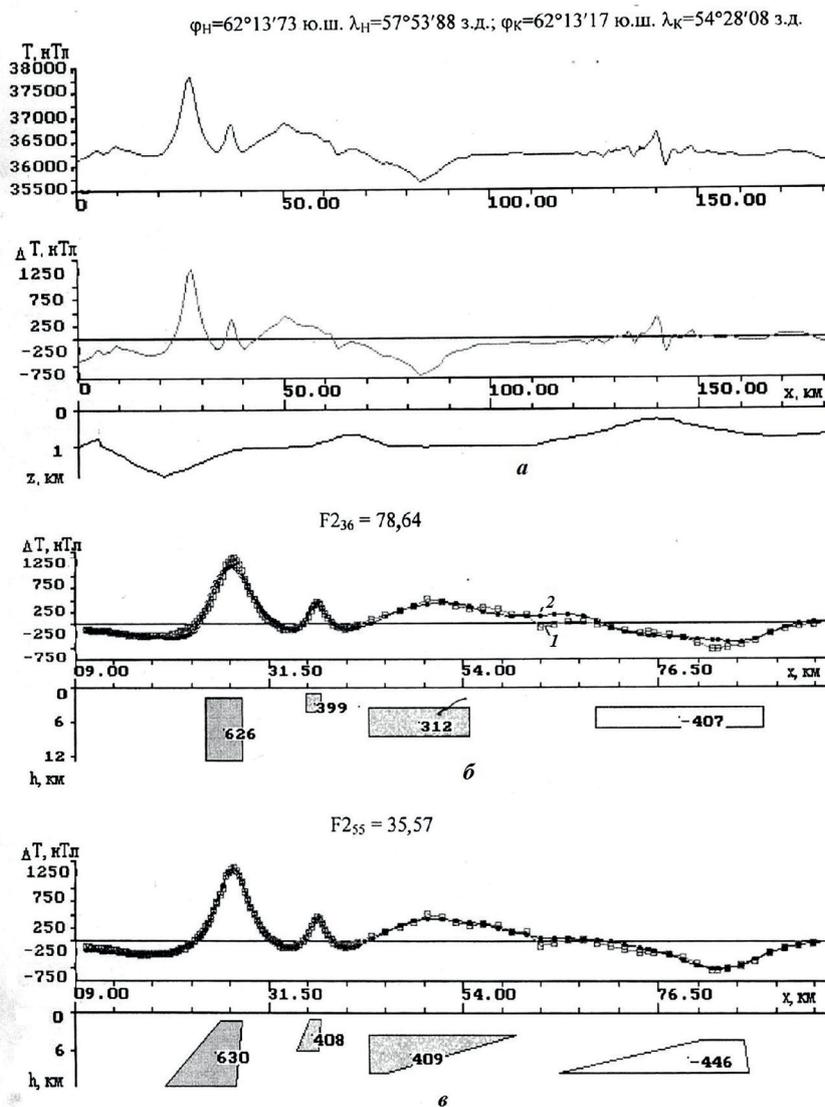


Рис. 1. Магнитное поле вдоль галса 0704 в проливе Брансфилд (а) и результаты восстановления конфигурации источников на его фрагменте телами призматической (б) и трапецидальной формы (в)

Fig. 1. The magnetic field along the 0704 line in the Bransfield Strait (a) and the results of reconstructing the source configuration on its fragment bodies of (b) prismatic and (c) trapezoidal shape

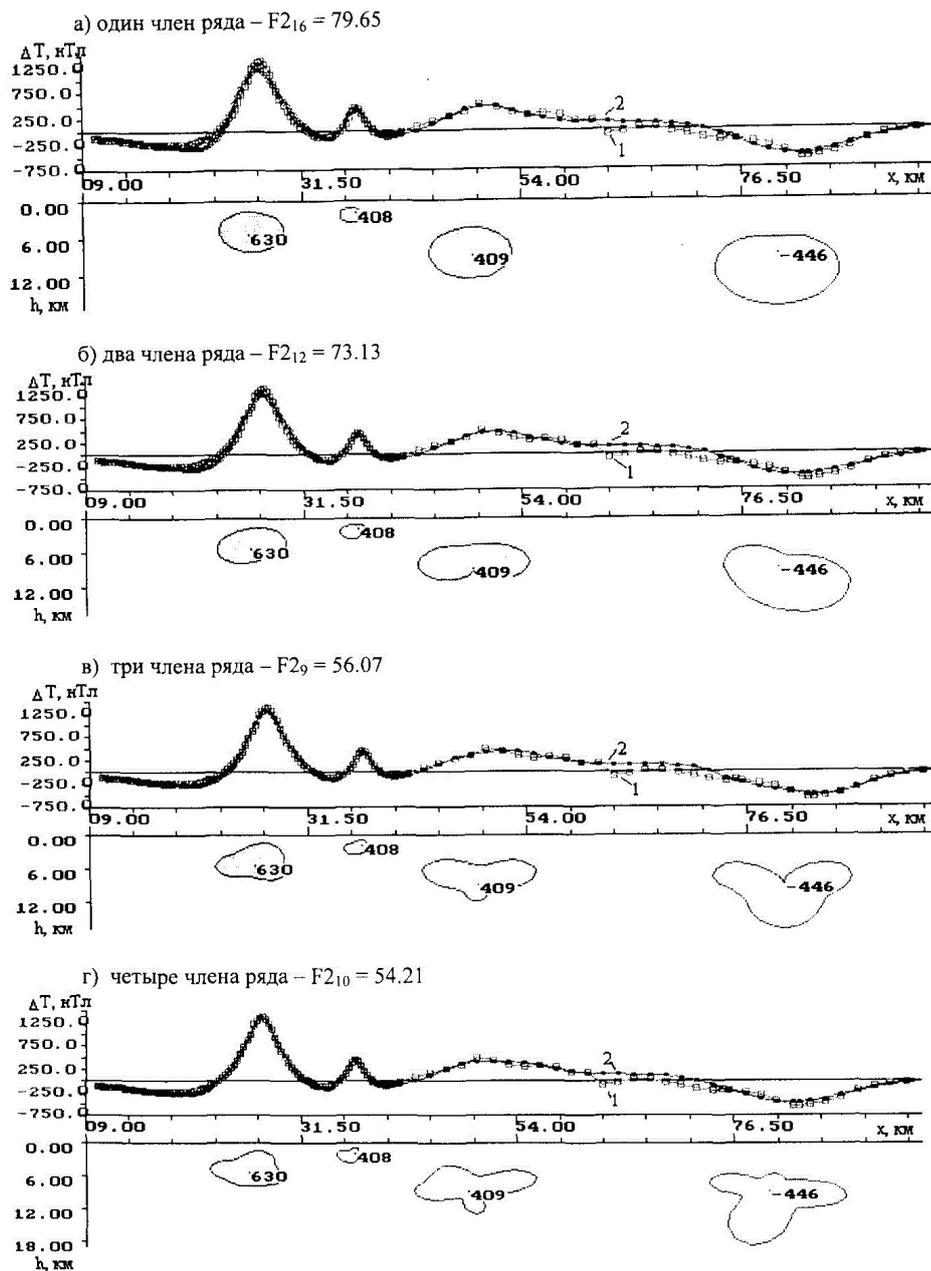


Рис. 2. Результаты восстановления конфигурации источников вдоль фрагмента галса 0704 в зависимости от количества членов ряда, аппроксимирующих радиус-вектор тел

Fig. 2. The results of the reconstruction of the source configuration along the 0704-line fragment, depending on the number of terms in the series that approximate the radius vector of the bodies

был отработан галс 0704, вдоль которого закартированы достаточно интенсивные магнитные аномалии (свыше 1000 нТл), которые могут быть связаны с подводными вулканическими комплексами (рис. 1, а). В силу этого отдельный фрагмент галса (рис. 1, б) использовался при отработке методических вопросов моделирования аномальных магнитных объектов с применением разработанной технологии их аппроксимации сложными контурами.

На первом этапе моделирования аномальное поле вдоль фрагмента галса 0704 было подобрано четырема аномальными объектами призматической формы. В процессе решения оптимизационной задачи на данном этапе геометрические параметры объектов подбирались одновременно со значениями интенсивностей намагничивания отдельных тел и коэффициентов линейного фона. Затем модели-

рование осуществлялось с помощью контуров трапецеидального сечения (рис. 1, в). С источниками такой формы точность восстановления аномальной кривой существенно образом улучшилась. Отметим, что на этом этапе моделирования интенсивность намагничивания и коэффициенты линейного фона подбирались также.

На следующем этапе моделирования выполнялась аппроксимация объектов контурами сложной конфигурации. При этом были зафиксированы интенсивности намагничивания объектов. Им присвоены значения, полученные на предыдущем этапе моделирования. Коэффициенты линейного фона подбирались в процессе решения задач. Координаты центров тяжести аномальных тел и начальные приближения радиусов-векторов задавались с учетом результатов предыдущего решения.

Задача решалась многократно с различным количеством членов усеченного тригонометрического ряда, аппроксимирующего радиус-вектор отдельных объектов. Некоторые варианты решения задачи представлены на рис. 2. Анализ этих результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением числа членов ряда, аппроксимирующих радиусы-векторы объектов, увеличивается точность восстановления аномальной кривой и усложняются подобранные конфигурации объектов; сильно вытянутый объект с отрицательным намагничиванием в конце профиля приобретает очертания, близкие к изометрическим, и располагается на существенно большей глубине, чем на предыдущем этапе подбора; точность восстановления аномальной кривой, полученная при аппроксимации объектов трапецеидальными контурами, не достигается.

Выше отмечалось, что на первом этапе моделирования одновременно с геометрическими параметрами подбиралась интенсивность намагничивания объектов. Полученные значения достаточно высокие, что противоречит выполненным измерениям намагниченности на образцах пород из данного региона. Поэтому на следующем этапе моделирования исследовалась возможность приближения аномального поля вдоль галса возмущающими объектами с меньшими значениями намагниченности. Для этой цели многократно решалась задача восстановления конфигурации объекта при различных фиксированных значениях намагниченности — 400; 300; 200; 150 (10^{-5} ед. СГСМ).

Выводы. Анализ полученных решений показывает следующее:

а) с уменьшением значений интенсивности намагничивания объектов уменьшается точность восстановления аномальной кривой вдоль галса, увеличивается мощность объектов и глубина погружения нижней кромки;

б) две высокоинтенсивные аномалии намагничивания объектов в начале галса невозможно удовлетворительно восстановить с помощью изолированных источников с низкими значениями намагниченности;

в) при использовании контуров сложной конфигурации высокоинтенсивные аномалии в начале профиля удовлетворительно восстанавливаются за счет уменьшения залегания глубины верхних кромок, что противоречит установленным фактам (верхние кромки поднимаются выше морского дна).

Выполненные вычисления дают веские основания утверждать, что высокоинтенсивные анома-

лии в начале галса 0704 обусловлены магнитовозмущающими источниками с достаточно высокими значениями намагниченности.

Список библиографических ссылок

1. Андреев В. И. Моделирование геологических образований методами пространственной гравиметрии. М.: Недра, 1992. 224 с.
2. Балк П.И., Долгаль А.С. Обратные задачи гравиметрии как задачи извлечения достоверной информации в условиях неопределенности. *Физика Земли*. 2012. № 5. С. 85—101.
3. Блох Ю.И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: МГГА, 1998. 88 с.
4. Булах Е.Г., Зейгельман М.С., Корчагин И.Н. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации. К., 1986. 235 с. (Препринт. Институт геофизики АН УССР. Деп. в ВИНТИ 08.12.86, N 8363-B86).
5. Булах Е.Г., Михеева Т.Л. Решение прямых и обратных задач гравиметрии в классе звездных тел. *Докл. НАН Украины*. 1993. № 7. С. 81—85.
6. Булах Е. Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. К.: Наук. думка, 2010. 463 с.
7. Кобрунов А.И. Теоретические основы решения обратных задач геофизики. Ухта: Изд-во Ухтин. индустр. ин-та, 1995. 228 с.
8. Yakymchuk M.A., Korchagin I.N., Kozlenko Ju.V., Orlova M.I., Solovjov V.D., Yakymchuk Ju.M. Gravity and magnetic investigations in the Antarctic Peninsula region during Ukrainian Antarctic expeditions. *62nd EAGE Conference and Technical Exhibition*. Glasgow, Scotland. 2000. Absr. pp.178-181.
9. Yakymchuk M.A., Korchagin I.N., Kozlenko Ju.V., Orlova M.I., Solovjov V.D., Yakymchuk Ju.M. Marine gravity and magnetic investigations in the West Antarctica Geology and Sustainable Development Challenges for the Third Millennium. *31st International Geological Congress*. CD-ROM Abstracts volume. Rio de Janeiro, 2000. [in Brazil].
10. Старостенко В.И. Гравитационное поле однородных n -угольных пластин и порождаемых ими призм: Обзор. *Физика Земли*. 1998. № 3. С. 37—53.
11. Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Савченко А.С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей (GMT-Auto). *Геофизический журнал*. 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52.
12. Страхов В.Н. Прямая и обратная задачи гравиразведки. Классы обратных задач. Гравиразведка: Справочник геофизика. М.: Недра, 1990. С. 220—225.

Поступила в редакцию 28.12.2017.

МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПІДБОРУ

Т.Л. Міхеєва, О.П.Лапіна, Н.В. Панченко

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна, e-mail: mtat@ukr.net, Lapina-Lena@ukr.net, panchenkov@ukr.net

Вивчено можливості застосування автоматизованого програмного комплексу інтерпретації гравітаційних і магнітних полів для реалізації кількісної інтерпретації практичних даних. Запропонована апроксимаційна конструкція надає інтерпретатору широкі можливості при моделюванні об'єктів складної форми, визначенні геометричних і фізичних параметрів магнітозбурювальних джерел. Обчислювальний експеримент проведено з використанням алгоритмів автоматизованого підбору. Програмний комплекс дає змогу отримати різноманітні розв'язки і легко реалізувати принцип послідовного ускладнення і уточнення моделі в процесі розв'язування задач моделювання. Як апроксимувальну конструкцію використано кілька класів тіл — фундаментальних форм для інтерпретації (однороз'язний контур, зіркове тіло), які застосовано як апроксимаційні осередки для опису геологічних об'єктів при інтерпретації спостережених аномалій. У Другій Українській морській антарктичній експедиції в затоці Брансфілд при відпрацюванні методичних питань моделювання аномальних магнітних об'єктів застосовано розроблену технологію апроксимації їх складними контурами. При інтерпретації магнітометричних даних вирішувати конкретні практичні завдання доцільно з використанням методики послідовного ускладнення моделі досліджуваного об'єкта. Виконані обчислення дають вагомий підстави стверджувати, що високоінтенсивні аномалії на початку галса 0704 зумовлені магнітозбурювальними джерелами з вищими значеннями намагніченості.

Ключові слова: обернена задача, апроксимаційна конструкція, магнітне поле, геологічний об'єкт, інтенсивність намагнічування, циліндрична комірка з багатокутним перерізом, зіркове тіло, інтерпретація.

MODELING OF MAGNETOMETRIC DATA USING AUTOMATED SELECTION ALGORITHMS

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

Institute of Geophysics, National Academy of Science of Ukraine, 32 Palladin Ave., Kiev 03680, Ukraine, e-mail: mtat@ukr.net, Lapina_Lena@ukr.net, panchenkov@ukr.net

Purpose. The article studies the possibility of using an automated software complex for interpreting gravitational and magnetic fields to provide quantitative interpretation of practical data. The proposed approximation design provides the interpreter with ample opportunities for modeling objects of complex shape, determining the geometric and physical parameters of magnetically disturbing sources.

Design/methodology/approach. The computer experiment was carried out using algorithms for automated selection. The software complex makes it possible to obtain multivariate solutions and easily realize the principle of sequential complication and refinement of the model in the process of solving modeling problems. Several classes of bodies, fundamental forms for interpretation (a single-connected contour, a stellar body) were used as an approximating construction and as approximating cells to describe geological objects in interpreting observed anomalies.

Results. The proposed approximation design allows us to conveniently parametrize perturbing sources with a complex distribution of physical properties, to implement a selection strategy with sequential complication of the model, moving from the use of simple approximating cells to more complex ones. In the Second Ukrainian Antarctic Marine Expedition in Bransfield Bay, when developing methodological issues of modeling anomalous magnetic objects, we used the developed technology of approximating objects with complex contours.

Practical value /implications. When interpreting magnetometric data, it is expedient to solve concrete practical problems using the method of sequentially complicating the model of the object under study. At the initial stages of modeling, it is possible to introduce a rough approximation of individual objects with polygonal contours of small dimension, and at subsequent stages, to introduce the approximation of objects with complex contours with a small number of parameters. The performed calculations provide strong reasons to state that the high-intensity anomalies at the beginning of the 0704 line are due to magnetically disturbing sources with higher magnetization values.

Keywords: inverse problem, approximate construction, magnetic field, geological object, intensity of magnetization, cylindrical cell with polygonal section, star body, interpretation.

References:

1. Andreev V. Y. Modelirovaniye heolohicheskikh obrazovaniy metodamy prostranstvennoy hravymetryy. M.: Nedra, 1992, 224 p. [in Russian].
2. Balk P.Y., Dolhal A.S. Obratnye zadachy hravymetryy kak zadachy yzvlacheniya dostovernoy ynformatsyy v usloviyakh neopredelennosti. *Fyzyka Zemly*. 2012, no 5, pp. 85-101. [in Russian].
3. Blokh Yu.Y. Kolychestvennaia interpretatsiya gravitatsyonnykh i magnitnykh anomaliiy. M.: МННА, 1998, 88 p. [in Russian].

4. Bulakh E.H., Zeihelman M.S., Korchahyn Y.N. Avtomatizirovannyi podbor gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii: programmno-algoritmicheskoe obespechenie i metodycheskye rekomendatsyy. K., 1986, 235 p. (Preprynt. Instytut heofiziky AN USSR. Dep. v VYNYTY 08.12.86, N 8363-V86). [in Russian].
5. Bulakh E.H., Mykheeva T.L. Reshenye priamykh i obratnykh zadach gravimetriy v klasse zvezdnykh tel. *Doklady NAN Ukrainy*. 1993, no. 7, pp. 81-85. [in Russian].
6. Bulakh E. H. Priamye i obratnye zadachy gravymetriy i magnitometriy. K.: Nauk. dumka, 2010, 463 p. [in Russian].
7. Kobrunov A. Y. Teoretycheskye osnovy resheniya obratnykh zadach geofiziky. Ukhta: Izd-vo Ukhtinskogo industr. instituta, 1995, 228 p. [in Russian].
8. Yakymchuk M.A. Korchagin I.N., Kozlenko Ju.V., Orlova M.I., Solovjov V.D., Yakymchuk Ju.M. Gravity and magnetic investigations in the Antarctic Peninsula region during Ukrainian Antarctic expeditions. *62nd EAGE Conference and Technical Exhibition*. Glasgow, Scotland, 2000, Absr. pp.178-181.
9. Yakymchuk M.A., Korchagin I.N., Kozlenko Ju.V., Orlova M.I., Solovjov V.D., Yakymchuk Ju.M. Marine gravity and magnetic investigations in the West Antarctica Geology and Sustainable Development Challenges for the Third Millennium. *31st International Geological Congress*. CD-ROM Abstracts volume. Rio de Janeiro, 2000 [in Brazil].
10. Starostenko V.Y. Gravytatsyonnoe pole odnorodnykh n -ugolnykh plastin i porozhdaemykh imi prizm: Obzor. *Fizika Zemli*. 1998, no. 3, pp. 37-53. [in Russian].
11. Starostenko V.Y., Lehostaeva O.V., Makarenko Y.B., Savchenko A.S. Kompleks programm avtomatyzirovannoi interpretatsyy dannykh potentsyalnykh polei (GMT-Auto). *Geophysical journal* 2015. Vol. 37, no.1, pp. 42-52. [in Russian].
12. Strakhov V.N. Priamaia i obratnaia zadachy gravirazvedki. Klassy obratnykh zadach. Gravirazvedka. Spravochnyk geofizika. M.: Nedra, 1990, pp. 220-225. [in Russian].

Received 28/12/2017