

Оценка точности определения параметров погребенных археологических объектов по данным разновысотной магнитной съемки на основе численного моделирования

Н. Д. Евменов¹, В. В. Воронин², П. Г. Дядьков^{1,2}, О. А. Позднякова³

¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Предложен алгоритм решения обратной задачи для определения параметров погребенного археологического объекта в виде эллиптического цилиндра (как модели типичного погребения или ямы). Выполнена оценка точности определения параметров погребенных археологических объектов на основе численного решения обратной задачи магниторазведки для синтетической модели. Ее реализация включала, во-первых, этап моделирования магнитного поля от синтетической модели археологического объекта на трех разных высотах для различных параметров плотности сетки и размеров участка проведения магнитной съемки и, во-вторых, этап решения обратной задачи по синтетическим данным на разных высотах для различных параметров проведения магнитной съемки с оценкой точности решения обратной задачи.

Получено, что на точность определения параметров аномального тела в большей степени влияет размер участка съемки, чем плотность сети измерений. Также отмечается тенденция повышения точности определения параметров при совместном использовании данных разновысотной съемки. Апробация алгоритма решения обратной задачи на реальных данных разновысотной магнитной съемки над погребением на археологическом памятнике Тартас-1 показала достаточно хорошие результаты. Средняя ошибка определения геометрических параметров тела и его залегания составила около 15 %.

Ключевые слова

магнитометрия, археология, численное моделирование, обратная задача, методика магнитной съемки, БПЛА

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-04314) и проекта ФНИ № 0331-2019-0012

Для цитирования

Евменов Н. Д., Воронин В. В., Дядьков П. Г., Позднякова О. А. Оценка точности определения параметров погребенных археологических объектов по данным разновысотной магнитной съемки на основе численного моделирования // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 1. С. 16–26. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-16-26

Estimation of Accuracy of Determination of Parameters of the Buried Archaeological Objects According to the Data of Different-Altitude Magnetic Survey on the Basis of Numerical Modeling

N. D. Evmenov¹, V. V. Voronin², P. G. Dyadkov^{1,2}, O. A. Pozdnyakova³

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Annotation

An algorithm for solving the inverse problem for determining the parameters of a buried archaeological object in the form of an elliptical cylinder (as a model of a typical burial or pit) is proposed. The estimation of accuracy of determination of parameters of the buried archaeological objects on the basis of the numerical solution of the inverse problem of magnetic prospecting for synthetic model is carried out. Its implementation included, firstly, the stage of modeling the magnetic field from a synthetic model of the archaeological site at three different heights for different parameters of the grid density and the size of the magnetic survey site and, secondly, the stage of solving the inverse problem from synthetic data at different heights, for different parameters of the magnetic survey and assessing the accuracy of the solution of the inverse problem.

It is found that the accuracy of determining the parameters of the anomalous body is more affected by the size of the survey area than the density of the measurement network. There is also a tendency to increase the accuracy of determining parameters when using data of different heights. Approval of the algorithm for solving the inverse problem on real data of different-altitude magnetic survey over the burial at the archaeological site Tartas-1 showed quite good results. The average error in determining the geometric parameters of the body and its occurrence is ~ 15 %.

Keywords

magnetometry, archaeology, numerical modeling, inverse problem, magnetic survey technique, UAV

Acknowledgments

The work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 17-29-04314) and project BSR № 0331-2019-0012

For citation

Evmenov N. D., Voronin V. V., Dyadkov P. G., Pozdnyakova O. A. Estimation of Accuracy of Determination of Parameters of the Buried Archaeological Objects According to the Data of Different-Altitude Magnetic Survey on the Basis of Numerical Modeling. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 1, p. 16–26. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-16-26

Введение

Магнитометрия является одним из ведущих геофизических методов поиска и изучения археологических памятников [1; 2]. Однако в археологии, в отличие от геологоразведочных задач, ее использование в абсолютном большинстве случаев ограничивается построением карт магнитного поля и определением планиграфического расположения археологических объектов [3; 4]. При этом не используются потенциальные возможности метода по определению параметров залегания погребенных объектов, в том числе такого важного параметра, как глубина залегания (верхняя и нижняя кромки). Методы определения этих параметров применительно к задачам поиска и разведки полезных ископаемых развивались достаточно давно [5; 6]. Как было показано ранее [7; 8], использование повысотных магнитных съемок может существенно облегчить решение обратных задач магниторазведки.

Несомненно, современный этап развития технологии магнитной съемки при решении задач археологии должен включать разработку специальных методов и алгоритмов для получения максимума возможной информации о погребенных археологических объектах. При этом следует также учитывать возросшие технические возможности данного метода: прецизионную точность используемых квантовых и протонных магнитометров, а также возмож-

ность проведения съемок на нескольких высотах с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [9; 10].

Данная работа направлена на решение именно этих задач и предполагает оценку погрешностей определения параметров залегания и формы погребенного тела в виде эллиптического цилиндра (как модели реального типичного погребения или ямы) при решении обратной задачи. При этом одной из важнейших задач работы является определение оптимальных параметров проведения магнитной съемки (размеров участка, шага сетки, высоты съемки и комбинаций двух и трех высот) и выработке соответствующих рекомендаций для практического применения.

Таким образом, основной целью данной работы является оценка точности определения параметров погребенных археологических объектов (погребения, ямы) на основе численного решения обратной задачи магниторазведки. Ее реализация включает следующие этапы:

- моделирование магнитного поля от синтетической модели археологического объекта (погребения) на разных высотах для различных параметров плотности сетки и размеров участка проведения магнитной съемки;
- решение обратной задачи по синтетическим данным на разных высотах, для различных параметров проведения магнитной съемки и оценка точности решения обратной задачи;
- апробация алгоритма решения обратной задачи на реальных данных разновысотной магнитной съемки для погребения на археологическом памятнике Тартас-1.

Алгоритм численного решения прямой и обратной задачи ¹

Постановка задачи

Решается задача восстановления параметров намагниченного тела исходя из данных магнитометрии. Известен постоянный вектор нормального поля, т. е. вектор магнитной индукции \vec{P}_0 . Имеется тело, для которого считается известным коэффициент магнитной восприимчивости χ , т. е. вектор удельной намагниченности тела есть $\vec{m} = \chi \cdot \vec{P}_0$.

Как известно, вектор магнитной индукции, порождаемой точечным диполем, может быть записан в виде

$$\vec{B}(\vec{R}_r, \vec{R}) = 3 \frac{(\vec{m}, \vec{r}) \cdot \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3}, \quad (1)$$

где m – магнитный момент диполя, $\vec{r} = \vec{R}_r - \vec{R}$ – вектор из источника в точку наблюдения. Из-за наличия аномального тела в каждом приемнике к вектору нормального поля \vec{P}_0 прибавляется добавочное поле $\vec{P}(\vec{R}_r)$, и измеряется модуль суммарного поля $|\vec{P}_0 + \vec{P}(\vec{R}_r)| = |\vec{P}_0 + \vec{P}(\vec{R}_r)|$.

Пусть точка наблюдения имеет координаты $\vec{R}_r = (x_r, y_r, z_r)$, а источник с координатами $\vec{R} = (x, y, z)$ пробегает тело V , которое назовем условно «цилиндром». А именно: верхнее основание V находится в плоскости $z = z_0$ и представляет собой эллипс с центром x_0, y_0, z_0 , полуосями (A_0, B_0) , причем первая ось повернута относительно координатной оси O_x на угол φ_0 . Нижнее основание – эллипс в плоскости $z = z_0 + H$ с центром $(x_1, y_1, z_1 + H)$, полу-

¹ Алгоритм разработан В. В. Ворониным.

осями (A_1, B_1) и с тем же углом поворота φ_0 . И параметры эллипса линейно меняются при изменении глубины сечения.

Итак, каждый цилиндриод характеризуется набором 11 параметров:

$$\Pi_{11} = (x_0, y_0, z_0, A_0, B_0, x_1, y_1, A_1, B_1, H, \varphi_0). \quad (2)$$

Обратная задача состоит в отыскании этого набора параметров аномального тела, где входной информацией является модуль суммарного поля $|\vec{P}_0 + \vec{P}(\vec{R}_r)|$, измеренный в точках регистрации магнитного поля над телом.

Расчет аномального поля (прямая задача)

Есть тело, для которого имеется свой набор параметров Π_{11} , перечисленных в формуле (2). Весь набор параметров будем обозначать Π_{11} .

Добавочное поле от тела в точке наблюдения представляется интегралом

$$\vec{P}_i(\Pi_{11i}, \vec{R}_r) = \iiint_{V_i} \vec{B}(\vec{R}_r, \vec{R}) dx dy dz, \quad (3)$$

где $\vec{R}_r = (x_r, y_r, z_r)$ – радиус-вектор точки наблюдения, $\vec{R} = (x, y, z)$ – радиус-вектор источника.

Для каждого положения приемника \vec{R}_r относительно тела производится вычисление интеграла в обобщенной полярной системе координат:

$$\vec{P}(\vec{R}_r) = \int_0^{2\pi} dt \int_0^1 \rho d\rho \int_0^1 H((1-\gamma)A_0 + \gamma A_1)((1-\gamma)B_0 + \gamma B_1) \vec{G}(\rho, t, \gamma) d\gamma \quad (4)$$

Поскольку координаты вектора \vec{r} в исходной формуле (1) линейно зависят от γ , то внутренний интеграл по переменной γ может быть взят по аналитическим формулам. А оставшийся от формулы интеграл по переменным ρ, t берется численно, по квадратурным формулам. При этом интеграл по угловой переменной t берется по равномерной на $[0, 2\pi]$ сетке. А для интегрирования по переменной ρ используется кусочно-гауссова квадратурная формула с четырьмя узлами.

Решение обратной задачи

Обратная задача по определению параметров тела решается с помощью оптимизации. Минимизируется квадрат невязки:

$$f_{11}(\Pi_{11}) = \sum_{r=1}^{N_r} \left(\left| \sum_{i=1}^{N_b} \vec{P}_i(\Pi_{11i}, \vec{R}_r) + \vec{P}_0 \right| - \left| \vec{P}_s(\vec{R}_r) \right| \right)^2, \quad (5)$$

где $|\vec{P}_s(\vec{R}_r)|$ – модуль наблюдаемого суммарного поля в приемнике с координатами \vec{R}_r .

Минимизация проводится методом Нелдера – Мида [11], который не требует вычисления градиентов. Результат предыдущего этапа берется за начальное приближение для следующего.

За начальное приближение берется прямой круговой цилиндр, то есть начальное $\Pi_{11} = (x_0, y_0, z_0, R, H)$, где x_0, y_0, z_0 – координаты центра верхнего основания, R – радиус цилиндра, H – его высота.

Варируется весь набор из 11 параметров тела, перечисленных в формуле (2), где x_0, y_0, z_0 – координаты центра верхнего основания, H – его высота, $(x_1, y_1, z_0 + H)$ – координаты центра нижнего основания; (A_0, B_0) и (A_1, B_1) – размеры полуосей для верхнего и нижнего основания соответственно, а также угол поворота φ_0 (одинаковый для обоих оснований).

Параметры модели археологического объекта и условий проведения магнитной съемки

Модель археологического объекта (погребения)

Описанный выше метод решает прямые и обратные задачи магниторазведки для тел цилиндрической формы с эллипсом в горизонтальном сечении. В археологии погребения и ямы в плане имеют округлую или овальную форму и, как правило, вытянуты по одной оси. Сверху они перекрыты почвенно-дерновым слоем. Глубина их нижней кромки может изменяться в значительных пределах – вплоть до 2,5 м (памятник Тартас-1). Таким образом, подбираемое в алгоритме тело «цилиндрической» формы подходит для интерпретации подобных археологических объектов. Предложенный алгоритм решения обратной задачи позволяет определять положения и размеры верхних и нижних кромок независимо друг от друга, так как погребения могут быть несимметричными и сужаться или расширяться с глубиной.

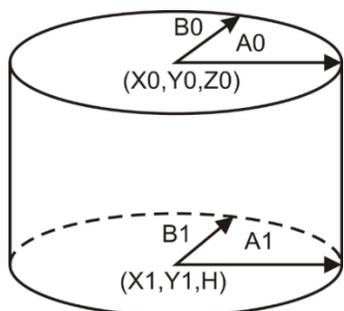


Рис. 1. Модель цилиндра с обозначением подбираемых параметров
Fig. 1. The cylinder model with the designation of the selected parameters

Для оценки точности определения параметров цилиндра были решены прямые задачи от простого тела с параметрами: $x_0, y_0, x_1, y_1 = 0$; $z_0 = 0,5$ м; $H = 1$ м; $a_0, a_1 = 2$ м; $b_0, b_1 = 1$ м; угол поворота тела $\varphi = 0$; магнитная восприимчивость $\chi = 90 \cdot 10^{-6}$ СИ (рис. 1). Значение магнитной восприимчивости соответствует реально измеренным значениям из погребений памятника Тартас-1.

Параметры условий проведения магнитной съемки

Как отмечалось выше, целью работы является определение точности решения обратной задачи в зависимости от таких параметров проведения магнитной съемки как размер участка, плотность сетки измерений и высота проведения магнитной съемки. Размеры участка определялись условием охвата как положительной, так и затухающей отрицательной аномалии от тела. Для данного условия наилучшим размером участка является размер 15×15 м. Худшим вариантом является охват только положительной аномалии (5×5 м). Сетка 10×10 м

взята как промежуточная, в пределах которой не наблюдается полное затухание отрицательной аномалии.

Минимальная плотность сетки для исследования тела с размерами 1×2 м – это профилирование с шагом 1 м (сетка 1×1 м) для того, чтобы хотя бы 3 профиля зафиксировали магнитную аномалию от объекта. Плотность сетки через $0,5 \times 0,5$ и $0,25 \times 0,25$ м взята исходя из необходимости лучшей детализации аномалии.

Высота съемки 0,5 м – это стандартная высота проведения магнитной съемки над археологическими объектами. Высота 1,1 м является характерной высотой расположения верхнего датчика градиентометра, где разнос между датчиками составляет от 0,6 м. Высота 2 м над землей соответствует, как правило, минимальной высоте проведения магнитной съемки с использованием БПЛА.

Таким образом, параметры условий проведения магнитной съемки были приняты следующими:

- размеры участков – 5×5 , 10×10 , 15×15 м;
- плотность измерений (расстояние между точками измерения поля по оси x и по оси y) – 0,25, 0,5, 1 м;
- высота съемки от уровня земли – 0,5, 1,1, 2 м.

Результаты численного моделирования и их анализ

Для оценки точности решения обратной задачи выполнено моделирование магнитного поля от археологического объекта (погребения) на разных высотах для различных параметров плотности сетки и размеров участка проведения магнитной съемки. Были решены прямые задачи для каждой комбинации «размер участка – плотность измерений – высота съемки». Всего получено 27 решений прямых задач.

Обратные задачи с подбором параметров аномального тела (погребения) были решены не только для каждой комбинации «размер участка – плотность измерений – высота съемки», но и для различных комбинаций высот: 0,5–1,1; 0,5–2; 1,1–2; 0,5–1,1–2 м. Количество решенных обратных задач равно 63-м.

Для выявления тенденций улучшения результатов решения обратных задач были составлены таблицы относительных погрешностей определения параметров тела в зависимости от изменения отдельного параметра. Для параметров (X_0 , Y_0 , X_1 , Y_1) и (A_0 , B_0 , A_1 , B_1) в таблице представлено среднее арифметическое значение погрешностей. Погрешность определения всех параметров рассчитывалась как среднее арифметическое по всем 10 параметрам тела за исключением угла поворота (он был неизменен и равен 0°). Отклонения значения параметров X_0 , Y_0 , X_1 , Y_1 брались относительно начального положения эллипсов нижней и верхней кромок соответственно, а именно если положение центров эллипсов оснований отличается на расстояние диаметра изначального тела, то ошибка определения центра тела будет составлять 100 %.

В табл. 1 приведен результат сравнения решения обратной задачи и модельного тела в относительных погрешностях (%) в зависимости от размеров участка. Анализ результатов показал, что наблюдается тенденция к уменьшению погрешности определения параметров тела при увеличении размера участка съемки.

В табл. 2 приведен результат сравнения решения обратной задачи и модельного тела в относительных погрешностях (%) для различной плотности сетки. Анализ свидетельствует о том, что при принятых параметрах плотности сетки не наблюдается явной зависимости погрешности определения параметров тела от плотности сетки.

В табл. 3 приведен результат сравнения решения обратной задачи в относительных погрешностях (%) для трех высот проведения магнитной съемки и их комбинаций. Важным параметром при интерпретации данных магнитометрии является определение глубины залегания нижней кромки. Видно, что наилучший результат достигается при решении обратной

задачи с применением всех трех высот. Также из табл. 3 видно, что геометрия тела подбирается лучше в случае комбинации двух (0,5–2; 1,1–2 м) или трех высот. Анализ результатов показал, что наблюдается тенденция к уменьшению погрешности определения параметров тела при привлечении разновысотных данных.

Таблица 1

Средняя погрешность определения параметра в зависимости от размера участка.

Table 1

The average error in determining the parameter depending on the size of the area.

Размер участка, м	Погрешность определения параметра / параметров, %				
	A0, B0, A1, B1	X0, Y0, X1, Y1	Z0	H	Все параметры
5 × 5	17	25	6	20	19
10 × 10	13	14	3	10	12
15 × 15	12	13	4	6	11

Условные обозначения для табл. 1–3:

- – Лучшие результаты
- – Промежуточные результаты
- – Худшие результаты

Таблица 2

Средняя погрешность определения параметра в зависимости от плотности сетки

Table 2

The average error in determining the parameter depending on the density of the grid

Плотность сетки, м	Погрешность определения параметра / параметров, %				
	A0, B0, A1, B1	X0, Y0, X1, Y1	Z0	H	Все параметры
0,25	13	21	5	13	15
0,5	14	19	3	13	15
1	15	12	5	10	12

Таблица 3

Средняя погрешность определения параметра
в зависимости от уровня высоты съемки

Table 3

The average error in determining the parameter
depending on the altitude of the survey

Высота, м	Погрешность определения параметра / параметров, %				
	H	Z0	X0, Y0, X1, Y1	A0, B0, A1, B1	Все параметры
0,5	21	2	13	17	14
1,1	5	8	25	16	18
2	15	6	26	13	18
0,5–1,1	16	4	18	18	17
0,5–2,0	10	2	11	13	11
1,1–2,0	10	6	15	13	13
0,5–1,1–2,0	5	2	14	9	10

Апробация метода на реальных данных

Для апробации метода были использованы данные разновысотной магнитной съемки над погребением № 639 памятника Тартас-1 (Барабинская лесостепь). На момент проведения исследований дерновый слой над погребением был снят. Контраст магнитной восприимчивости (χ) между заполнением погребения и вмещающей породой составлял $90 \cdot 10^{-6}$ СИ. Магнитная съемка над телом была проведена на четырех высотах: 0,25, 0,5, 1 и 1,75 м над землей. Результаты решения обратной задачи для данных разновысотной магнитной съемки представлены ниже. На рис. 2 видно, что контуры и амплитуды поля от тела, подобранного при решении обратной задачи на разновысотных данных, практически полностью совпадают с реально замеренными данными. Суммарный результат представлен в табл. 4, где приведены значения подобранного тела и реальные значения погребения, которые были замерены при его раскопках. Данный результат показывает, что средняя ошибка определения геометрических параметров тела и его залегания равна $\sim 15\%$. Максимальная ошибка имеет место при определении глубины залегания нижней кромки аномального тела, она равна 30% .

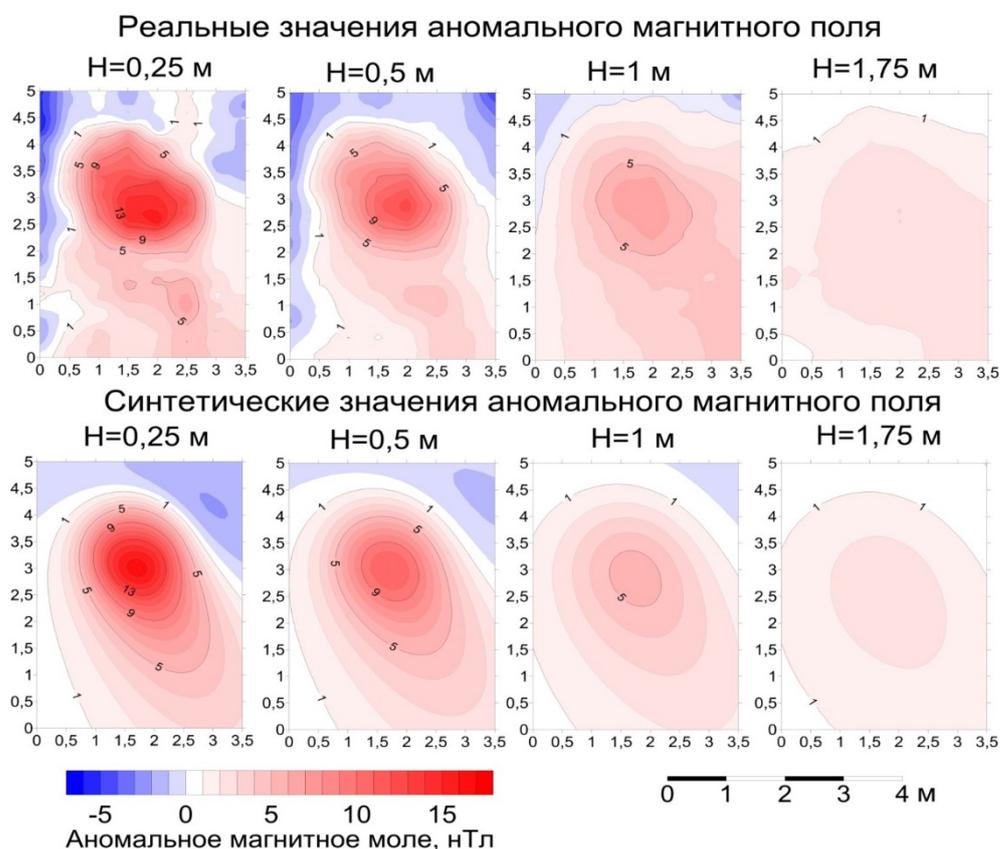


Рис. 2. Замеренное аномальное магнитное поле на высоте 0,25, 0,5, 1 и 1,75 м над погребенным археологическим объектом № 639 памятника Тартас-1 (вверху) и рассчитанное на высоте 0,25, 0,5, 1 и 1,75 м поле от тела, подобранного при решении обратной задачи для разновысотных данных (внизу)

Fig. 2. The measured anomalous magnetic field at heights of 0.25, 0.5, 1 and 1.75 meters above the buried archaeological object No. 639 of the Tartas-1 site (above) and the magnetic field from the interpreted body, calculated at heights of 0.25, 0.5, 1 and 1.75 meters, selected from the inversion for different heights data (down)

Таблица 4

Параметры цилиндра после решения обратной задачи
и параметры погребения после раскопок

Table 4

Cylinder parameters after the inversion and burial parameters after excavation

	Параметры цилиндра, м									
	X0	Y0	Z0	A0	B0	X1	Y1	H	A1	B1
Модель	1,65	3,11	0,15	0,81	0,81	1,53	2,41	1,07	1,09	0,81
Раскоп	~ 1,5	~ 3	0	1,1	0,9	~ 1,5	~ 3	0,72	1	0,75

Заключение

В работе предложен алгоритм решения обратной задачи для определения параметров погребенного аномального тела в виде эллиптического цилиндра (как модели типичного погребения или ямы).

Выполнена оценка точности определения параметров погребенных археологических объектов на основе численного решения обратной задачи магниторазведки для синтетической модели. Получено, что на точность определения параметров аномального тела в большей степени влияет размер участка съемки, чем плотность сети измерений. Также отмечается тенденция повышения точности определения параметров при совместном использовании данных разновысотной съемки.

Апробация алгоритма решения обратной задачи на реальных данных разновысотной магнитной съемки над погребением на археологическом памятнике Тартас-1 показала достаточно хорошие результаты. Средняя ошибка определения геометрических параметров тела и его залегания равна ~ 15 %. Максимальная ошибка имеет место при определении глубины залегания нижней кромки аномального тела, но она не превышает 30 % (в абсолютном выражении около 30 см при глубине залегания тела около 1 м).

Список литературы

1. **Fassbinder J. W. E.** Magnetometry for Archaeology. In: A. S. Gilbert (ed.) *Encyclopedia of Geoarchaeology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Dordrecht, Springer, 2017. DOI 10.1007/978-1-4020-4409-0
2. **Дядьков П. Г., Молодин В. И., Чемякина М. А., Михеев О. А.** Магнитометрические исследования археологических памятников Тартас-1 и Преображенка-6 в Барабинской лесостепи // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий: Материалы Годовой сессии Ин-та археологии и этнографии СО РАН. Новосибирск, 2005. Т. 11, ч. 1. С. 304–309.
3. **Becker H., Fassbinder J. W. E.** Magnetometry of a Scythian Settlement in Siberia near Cichah in the Baraba steppe. *Archeological Prospection*, 1999, vol. 31, p. 168–172.
4. **Bedford B.** Magnetic surveying reveals hidden ancient buildings and streets. *Eos*, 11 January 2019. DOI 10.1029/2019EO113625.
5. **Миков Д. С.** Атлас теоретических кривых для интерпретации магнитных и гравитационных аномалий. Томск, 1955. 146 с.
6. **Логачев А. А., Захаров В. П.** Магниторазведка. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1973. 351 с.
7. **Ларионов В. А.** Палетки теоретических кривых для интерпретации повысотных измерений магнитного поля // Тр. Ин-та геологии и геофизики. Новосибирск, 1961. Вып. 11: Вопросы разведочной геофизики, сб. 2. С. 99–108.

8. Ларионов В. А. Определение вертикальных размеров возмущающих объектов по функциям $\Delta T(z)$ и $\Delta Z(z)$ // Геология и геофизика. 1964. № 5. С. 96–105.
9. Эпов М. М., Молодин В. М., Манштейн Л. К., Балков Е. В., Дядьков П. Г., Матасова Г. Г., Казанский Л. Ю., Бортникова С. Б., Позднякова О. А., Карин Ю. Г., Кулешов Д. А. Мультидисциплинарные археолого-геофизические исследования в Западной Сибири // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 3. С. 603–614.
10. Фирсов А. П., Злыгостев И. Н., Дядьков П. Г., Савлук А. В., Вайсман П. А., Шеремет А. С., Вальд А. К., Евменов Н. Д. Применение высокочастотного магнитометра для лёгких БПЛА при геолого-геофизическом изучении трубок взрыва // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр.: Сб. материалов: В 4 т. Новосибирск: СГГА, 2015. Т. 2. С. 299–304.
11. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, 1965, vol. 7, p. 308–313.

References

1. Fassbinder J. W. E. Magnetometry for Archaeology. In: A. S. Gilbert (ed.) Encyclopedia of Geoarchaeology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht, Springer, 2017. DOI 10.1007/978-1-4020-4409-0
2. Dyadkov P. G., Molodin V. I., Chemyakina M. A., Mikheev O. A. Magnetometric studies of archaeological monuments Tartas-1 and Preobrazhenka-6 in the Barabinsk forest-steppe. In: Problems of archaeology, Ethnography, anthropology of Siberia and adjacent territories: Materials of the Annual session of the Institute of archaeology and Ethnography SB RAS 2005. Novosibirsk, 2005, vol. 11, pt. 1, p. 304–309. (in Russ.)
3. Becker H., Fassbinder J. W. E. Magnetometry of a Scythian Settlement in Siberia near Cichah in the Baraba steppe. *Archeological Prospection*, 1999, vol. 31, p. 168–172.
4. Bedford B. Magnetic surveying reveals hidden ancient buildings and streets. *Eos*, 11 January 2019. DOI 10.1029/2019EO113625.
5. Mikov D. S. An Atlas teoreticheskikh krivih dly interpretazii magnitnih i gravitazionnih anomalii. Tomsk, 1955, 146 p. (in Russ.)
6. Logachev A. A., Zakharov V. P. Magnitorazvedka. 4th ed. Leningrad, Nedra Publ., 1973, 351 p. (in Russ.)
7. Larionov V. A. Paletki teoreticheskikh krivih dly interpretazii povisotnih izmerenii magnitnogo polya. In: Trudi Instituta geologii i geofiziki. Novosibirsk, 1961, iss. 11, book 2, p. 99–108. (in Russ.)
8. Larionov V. A. Determination of the vertical dimensions of the perturbing object function $\Delta T(z)$ and $\Delta Z(z)$. *Geology and Geophysics*, 1964, no. 5, p. 96–105. (in Russ.)
9. Eпов M. M., Molodin V. M., Manstein L. K., Balkov E. V., Dyadkov P. G., Matasova G. G., Kazansky L. Yu., Bortnikova S. B., Pozdnyakova O. A., Karin Yu. G., Kuleshov D. A. Multidisciplinary archaeological and geophysical research in Western Siberia. *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 3, p. 603–614. (in Russ.)
10. Firsov A. P., Zlygostev I. N., Dyadkov P. G., Savluk A. V., Vaisman P. A., Sheremet A. S., Wald A. K., Evmenov N. D. Application of high-frequency magnetometer for light UAVs in geological and geophysical study of explosion tubes. In: Interexpo GEO-Siberia-2015. The XI Intern. Science. Cong. In 4 vols. Novosibirsk, 2015, vol. 2, p. 299–304. (in Russ.)
11. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, 1965, vol. 7, p. 308–313.

Материал поступил в редколлегию

Received
25.11.2019

Сведения об авторах

Евменов Николай Денисович, аспирант лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
evmenovnd@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0003-0164-8610

Воронин Владислав Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент Новосибирского государственного университета (Новосибирск, Россия)
vladvor1948@bk.ru
ORCID 0000-0002-1727-1873

Дядьков Петр Георгиевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
DyadkovPG@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0001-5345-9331

Позднякова Ольга Анатольевна, научный сотрудник Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия)
olka.pozdnyakova@gmail.com
ORCID 0000-0001-8376-0344

Information about the Authors

Nikolay D. Evmenov, Graduate Student at the Laboratory of Natural Geophysical Fields of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)
evmenovnd@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0003-0164-8610

Vladislav V. Voronin, PhD, Associate Professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
vladvor1948@bk.ru
ORCID 0000-0002-1727-1873

Petr G. Dyadkov, PhD, Associate Professor, Head of the Laboratory of Natural Geophysical Fields of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)
DyadkovPG@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0001-5345-9331

Olga A. Pozdnyakova, Researcher, Institute of Archeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)
olka.pozdnyakova@gmail.com
ORCID 0000-0001-8376-0344