



ОБ ИЗМЕРЕНИИ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО МАГНИТОМЕТРА, РАЗМЕЩЕННОГО НА ПОДВИЖНОМ НОСИТЕЛЕ

И.Н. Злыгостев^{1,2}, М.И. Эпов^{1,2}, А.В. Савлук¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья
630091, Новосибирск, Красный проспект, 67, Россия,
e-mail: ZlygostevIN@ipgg.sbras.ru

В статье описывается применение векторного ферромагнитного магнитометра, размещенного на беспилотном воздушном судне (БВС). Показано, что решение обратных задач магниторазведки при векторной аэромагнитной съемке позволяет выделять области с разной намагниченностью. Представлен простой, основанный на стандартных библиотеках, программный продукт обработки первичных данных трехкомпонентных феррозондовых магнитометров, который позволяет корректно выделять компоненты вектора магнитной индукции при выполнении магниторазведочных работ с использованием БВС. Для построения карт предложен способ графического отображения векторного поля. На конкретном примере одного из техногенных объектов показано, что векторные поля, измеренные на разных высотах, дают существенно большую информацию, чем обычные традиционные измерения электромагнитной индукции.

Вектор индукции магнитного поля, феррозондовый векторный магнитометр, разновысотная аэромагнитная съемка, вариационные задачи, карты вектора магнитной индукции, потенциальные поля, магнитные аномалии

ON THE MEASUREMENT OF THE MAGNETIC INDUCTION VECTOR WITH THE USE OF A THREE-COMPONENT MAGNETOMETER PLACED ON A MOBILE CARRIER

I.N. Zlygostev^{1,2}, M.I. Epov^{1,2}, A.V. Savluk¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Scientific Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Krasny Ave., 67,
Novosibirsk, 630091, Russia,
e-mail: ZlygostevIN@ipgg.sbras.ru

The article describes the use of a vector ferromagnetic magnetometer placed on an unmanned aerial vehicle (UAV). It is shown that solving inverse problems of magnetic prospecting for a vector aeromagnetic survey makes it possible to identify areas with different magnetization. We present a simple, based on standard libraries, software product for processing primary data of three-component fluxgate magnetometers, which allows correctly selecting the magnetic induction vector components when performing magnetic UAV surveys. To build maps, a method for graphical display of a vector field is proposed. On the example of a man-made object, we demonstrate that vector fields measured at different heights provide significantly more information than conventional electromagnetic induction measurements.

Magnetic field induction vector, fluxgate vector magnetometer, different-altitude aeromagnetic survey, variational problems, magnetic induction vector maps, potential fields, magnetic anomalies

ВВЕДЕНИЕ

Одним из информативных методов геофизики является магнитная разведка. Этот метод основан на изучении особенностей (аномалий) распределения в верхнем полупространстве значений геомагнитного поля, обусловленных неоднородностью строения земной коры, а также объектов искусственного происхождения (техногенных, археологических и др.).

Магниторазведка применяется для решения задач региональной структурной геологии, геологического картирования разных масштабов, поисков и разведки месторождений рудных полезных ископаемых, поиска погребенных археологических и техногенных объектов, а также при проведении специальных работ в области инженерной геофизики.

Результатом магнитометрии являются первичные данные о наблюдаемом в воздухе или на земной поверхности векторе магнитной индукции (ВМИ) или ее модуля.

Цель решения обратной задачи заключается в определении элементов залегания (форма, размеры, глубина) и их магнитных свойств по наблюдаемым значениям ВМИ. Эти решения являются некорректными, и их регуляризация требует привлечения априорной информации о строении исследуемой среды и возможно полного пространственного описания ВМИ.

Для полного описания векторного поля (в математическом смысле) достаточно знать значения его трех ортогональных компонент в исследуемом пространстве в фиксированной системе координат. Традиционно в магниторазведке измеряется только модуль ВМИ. На основании данных можно приближенно вычислить отдельные компоненты пространственного градиента, которые не являются потенциальными функциями. При дальнейшем анализе это ограничение, как правило, не учитывается, что приводит к значительным трудностям при интерпретации. При наличии прямых измерений трех ортогональных компонент ВМИ можно вычислить значения элементов **тензора** (составляется из пространственных градиентов каждой из компонент), не имеющих этого ограничения [Blakely, 1996; Schmidt, Clark, 2006].

Следовательно, измерения компонент ВМИ в фиксированной системе координат дают возможность уменьшить неопределенность решения обратных задач и сократить области их неоднозначности путем полноценного использования возможностей векторного и тензорного анализа в существующих программных продуктах, разработанных для исследования потенциальных полей, и повысить качество интерпретации данных магниторазведки.

АППАРАТУРА, МЕТОДИКА, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Рассмотрим особенности аэромагнитной съемки с магнитоизмерительными системами на беспилотных воздушных судах (БВС). Точность измерения ВМИ определяется собственными шумами магнитоизмерительной системы и паразитным влиянием БВС. Интеграция в единую систему БВС и магнитометрического оборудования является очень важной задачей, поиск решения которой требует комплексного подхода. Кроме того, для получения кондиционных данных необходима доработка существующих методик проведения магниторазведки.

Магнитоизмерительная система

Для выполнения измерений всех компонент ВМИ необходимо использовать трехкомпонентные магнитометры, изготовленные на базе анизотропных первичных преобразователей. Наиболее

подходящим комплексом технических и метрологических характеристик обладают доступные на рынке серийные феррозондовые магнитометры:

- диапазон измерения компонент ВМИ $\pm 100\,000$ нТл;
- собственный магнитных шум в полосе 0.0–100 Гц менее 0.01 нТл;
- размеры не более $\varnothing 30 \times 225$ мм;
- вес не более 150 г;
- потребляемая мощность менее 1.2 Вт.

В ИНГГ СО РАН разработаны и изготовлены опытные образцы магнитоизмерительной системы с использованием магнитометра FGM3D/75 двух типов: «ВМК-17/3» и «ВЕКТОР-Т-ИНС» [Злыгостев и др., 2020]. Они отличаются тем, что в «ВЕКТОР-Т-ИНС» измерительный блок дополнен модулем инерциальной навигационной системы.

Собственные магнитные шумы этих систем не превышают 0.01 нТл, а разрешающая способность составляет 0.002 нТл. Шумовые характеристики определяют минимально возможную амплитуду достоверно определяемой аномалии: согласно известному правилу «3 σ » она равна 0.03 нТл.

Для уменьшения паразитного влияния на измеряемую ВМИ ферромагнитных элементов электронного блока и приемника спутниковой навигационной системы (СНС) измерительный блок выполнен в виде выносной гондолы. Последний удален от несущей платформы на расстояние около полутора метров и соединен с электронным блоком несущим кабель-тросом. Общий вид системы «ВЕКТОР-Т-ИНС» представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид системы «ВЕКТОР-Т-ИНС»

Выбор носителя

Для высокоточных детальных работ БВС должен летать с детальным огибанием рельефа на высотах от 10 до 100 м. Конструкция носителя должна обеспечивать минимальные искажения измеряемого ВМИ и низкий уровень магнитных шумов от штатного электрооборудования (включая винтомоторную группу).

В ИНГГ СО РАН разработан и изготовлен опытный образец БВС типа «квадрокоптер», оснащенный четырьмя электродвигателями DJI 4216 с углепластиковыми пропеллерами (диаметр 17.6 дюйма). Конструкция такого типа БВС обеспечивает минимальный уровень магнитных помех по сравнению с БВС типов «вертолет» или «гексакоптер». Обоснованность этого выбора подтверждена в работе [Tuck et al., 2021].

Базовая платформа из немагнитных материалов оснащена системой передачи данных телеметрии, видео и магнитной съемки в реальном времени с одновременной записью во встроенную съемную флэш-память. В качестве модуля автопилота использовался полетный контроллер «Pixhawk». Для позиционирования БВС использована СНС GPS-ГЛОНАСС. Точность определения координат (после постобработки) по латерали – не хуже 0.1 м, по высоте – не хуже 0.2 м. Для создания полетного маршрута используется открытое программное обеспечение «Mission Planner». Общий взлетный вес БВС около 5 кг. В качестве источника питания использовались аккумуляторные батареи (25 В на 12 и 16 А·ч). Это обеспечивает примерно 40 минут полета. Общий вид БВС представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид БВС

Для уменьшения влияния источников магнитного шума от носителя магнитоизмерительные системы удалены от базовой платформы на расстояние около 7–10 м (соединены с носителем немагнитным тросом).

В период полевых сезонов 2016–2020 гг. был выполнен большой объем аэромагнитной съемки ряда археологических и геологических объектов с использованием системы «ВМК-17/3». Погрешность аэромагнитных измерений мТл [Инструкция..., 1981] (среднеквадратическое отклонение отдельных измерений от осредненной кривой записи), рассчитанная при анализе первичных данных, не превышает 0.15 нТл.

Методика

Рассмотрим особенности выполнения аэромагнитной съемки с использованием БВС в качестве носителей магнитоизмерительных систем.

Общая методика выполнения площадной аэромагнитной съемки уже описана, для изучения тонкой пространственной структуры ВМИ необходимо ее уточнение.

В работе [Kosykh et al., 2018] показано, что использование разновысотных данных снижает неопределенность решения обратных задач по сравнению с решениями по одновысотным данным. Поэтому предпочтительнее разновысотная аэромагнитная съемка (как минимум, на трех высотах) по примерно одним и тем же маршрутам с разницей высот около 10 м. При этом желательно выполнять полеты с детальным огибанием рельефа на высотах от 20 до 100 м.

Аэромагнитная съемка с детальным огибанием рельефа выполняется на трех высотах по системе встречно-параллельных рядовых профилей, охватывающих весь исследуемый участок.

Программные средства

Для полного описания векторного поля ВМИ необходимо знать значения трех компонент в исследуемой части пространства в фиксированной системе координат. На первом этапе обработки первичных данных необходимо выполнить их нормализацию для устранения систематических погрешностей путем проведения скалярной калибровки магнитоизмерительной системы в целом. Целью этой процедуры заключается в измерениях компонент ВМИ в ортогональной системе координат с учетом разброса коэффициентов преобразования (чувствительности) между каналами и смещений нуля. Это широко применяемая операция, детальное описание которой изложено во многих работах, например, [Le Maire et al., 2020].

После проведения скалярной калибровки получается массив данных с результатами измерений компонент ВМИ в ортогональной системе координат с хаотическими изменениями ее ориентации. Задача состоит в получении этих значений в системе координат с зафиксированной ориентацией. Есть два варианта решения этой задачи:

- измерить угловые координаты осей векторного магнитометра при помощи инерциальной навигационной системы (ИНС) и выполнить стандартную операцию вращения для возврата осей в положение, признанное исходным;
- подбор системы координат, минимизирующий значения функционала невязки между измеренными данными и модельными данными.

В наличии есть наборы первичных данных векторной аэромагнитной съемки на ряде объектов без применения модуля ИНС. Поэтому задачу целесообразно решать по второму варианту с улучшением качества и повышением детальности интерпретации.

После выполнения скалярной калибровки есть набор значений модуля ВМИ во всех точках измерений, которые практически не зависят от ориентации системы координат.

$$|\vec{B}_i| = \sqrt{B_{xi}'^2 + B_{yi}'^2 + B_{zi}'^2},$$

где B_{ji}' – нормализованные значения компонент ВМИ в i -ой точке системы наблюдений (в системе координат магнитометра). Для выполнения последующей работы необходимо проредить полученный массив данных путем осреднения измерений на некотором интервале времени. Его длительность необходимо выбрать так, чтобы за это время углы поворота векторного измерителя не превышали 1° , а

его перемещение – 1 м. Для данной системы длительность интервала выбрана равной 0.1 с.

Модуль ВМИ в начальной (нулевой, $i=0$) точке измерений

$$|\vec{B}_0| = \sqrt{B_{0x}'^2 + B_{0y}'^2 + B_{0z}'^2}.$$

Используя угол наклоения I основного магнитного поля Земли в данном месте (текущее поколение модели IGRF), вычисляем вертикальную (Z) и горизонтальную (Γ) компоненты ВМИ

$$B_{0z} = |\vec{B}_0| \cdot \cos I,$$

$$B_{0\Gamma} = |\vec{B}_0| \cdot \sin I.$$

Фиксируем положение системы координат в плоскости $X-Y$. Для этого, полагая $B_{0y} = 0$, $B_{0x} = B_{0\Gamma}$ (ось X направлена на магнитный полюс Земли), формируется система линейных уравнений (СЛАУ) (1). Здесь $[M_0]$ – базовая матрица поворота, зависящая углов Эйлера – α , β и γ (6).

$$\begin{bmatrix} B_{0x}' \\ B_{0y}' \\ B_{0z}' \end{bmatrix} = [M_0] \cdot \begin{bmatrix} B_{0x} \\ 0 \\ B_{0z} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma & -\cos \alpha \cdot \sin \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \cos \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \gamma & -\sin \alpha \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma & -\cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \beta \cdot \sin \gamma & \sin \beta \cdot \cos \gamma & \cos \beta \end{bmatrix}.$$

Решая (1), находим значения элементов матрицы поворота $[M_0]$.

Предположим, что в следующей точке измерений магнитометр изменил угловое положение ($\alpha_1 = \alpha_0 \pm \delta_\alpha$, $\beta_1 = \beta_0 \pm \delta_\beta$, $\gamma_1 = \gamma_0 \pm \delta_\gamma$). Следовательно, изменяется и значение модуля ВМИ ($|B_1|$), а также значения нормализованных компонент B_{1i}' . СЛАУ в этой точке

$$\begin{bmatrix} B_{1x}' \\ B_{1y}' \\ B_{1z}' \end{bmatrix} = [M_1] \cdot \begin{bmatrix} B_{0x} \pm \varepsilon_{1x} \\ B_{0y} \pm \varepsilon_{1y} \\ B_{0z} \pm \varepsilon_{1z} \end{bmatrix}.$$

Для определения значений B_{1k} ($B_{1k} = B_{0k} \pm \varepsilon_{1k}$, $k=x, y, z$) необходимо решить эту систему путем вариации параметров δ_α , δ_β , δ_γ , ε_k , требуя минимизации следующего функционала

$$F_1 = (B_{0x} - B_{1x})^2 + (B_{0y} - B_{1y})^2 + (B_{0z} - B_{1z})^2.$$

Диапазон вариации параметров $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma \leq 1^\circ$, $\varepsilon_{1k} \leq |B_{0k}' - B_{1k}'|$.

Аналогично, для i -ой точки ($\alpha_i = \alpha_{i-1} \pm \delta_\alpha$, $\beta_i = \beta_{i-1} \pm \delta_\beta$, $\gamma_i = \gamma_{i-1} \pm \delta_\gamma$), $\delta_\alpha, \delta_\beta, \delta_\gamma \leq 1^\circ$ и $\varepsilon_{ik} \leq |B_{(i-1)k}' - B_{ik}'|$.

$$\begin{bmatrix} B'_{ix} \\ B'_{iy} \\ B'_{iz} \end{bmatrix} = [M_i] \cdot \begin{bmatrix} B_{(i-1)x} \pm \varepsilon_{ix} \\ B_{(i-1)y} \pm \varepsilon_{iy} \\ B_{(i-1)z} \pm \varepsilon_{iz} \end{bmatrix},$$

$$F_i = (B_{(i-1)x} - B_{ix})^2 + (B_{(i-1)y} - B_{iy})^2 + (B_{(i-1)z} - B_{iz})^2.$$

После выполнения этих операций, начиная с исходного массива первичных данных, получим значения компонент ВМИ в геомагнитной системе координат.

Описанный алгоритм вычислений реализован в программе «ВЕКТОР-Т» [Савлук, Злыгостев, 2019]. Решения вариационных задач выполняется с использованием решателя из стандартного пакета Microsoft Solver.

Визуализация результатов

Поскольку для решения задачи магниторазведки исследуется структура магнитных аномалий, то необходимо рассмотреть различные типы проекций аномального ВМИ. Для получения последней предлагается вычислить средние значения компонент ВМИ по всему массиву полученных данных и вычесть их из исходных.

Для наглядного отображения необходимо разработать вид графического отображения векторного поля. Так для построения карт использован следующий подход: направление аномального ВМИ отображается стрелками, а градация их цвета (от малых красных до больших синих) соответствует их модулю.

На рисунках 3 и 4 представлены карты горизонтальной составляющей аномального ВМИ (ГВМИ) (проекция на плоскость X–Y) по независимым аэромагнитным съемкам на высотах 3 и 7 м на реальном объекте в 2018 г.

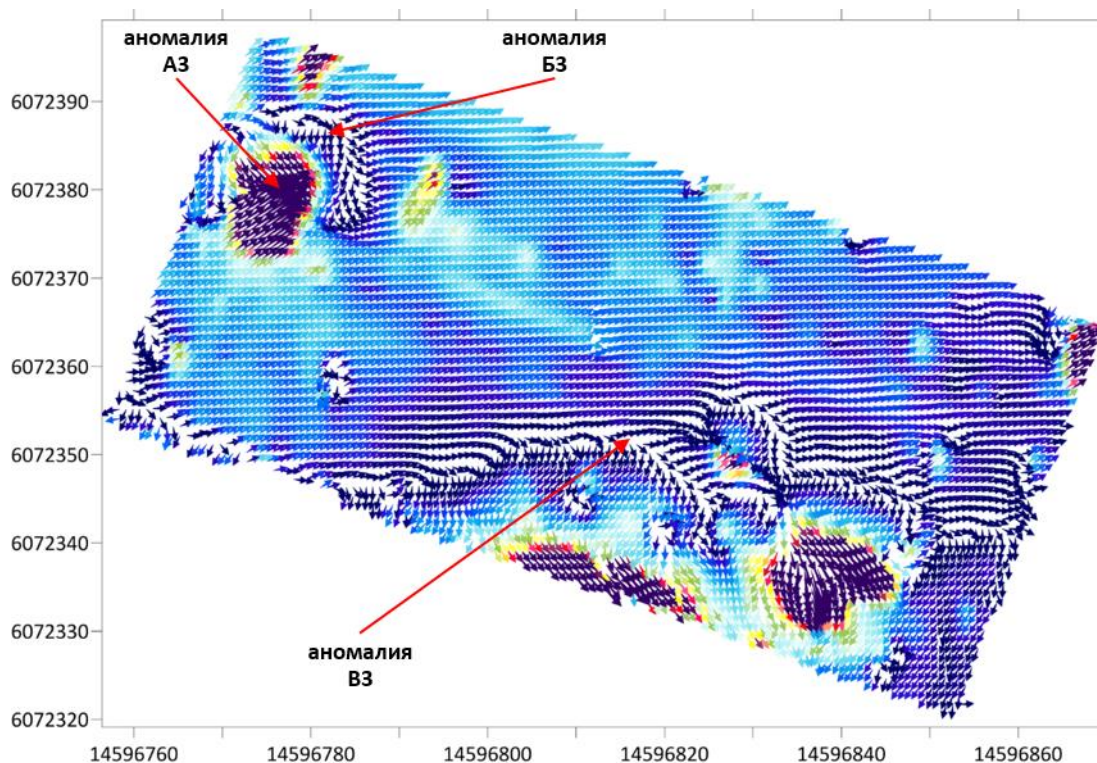


Рис. 3. Карта горизонтальной составляющей аномального ВМИ (высота полета 4 м)

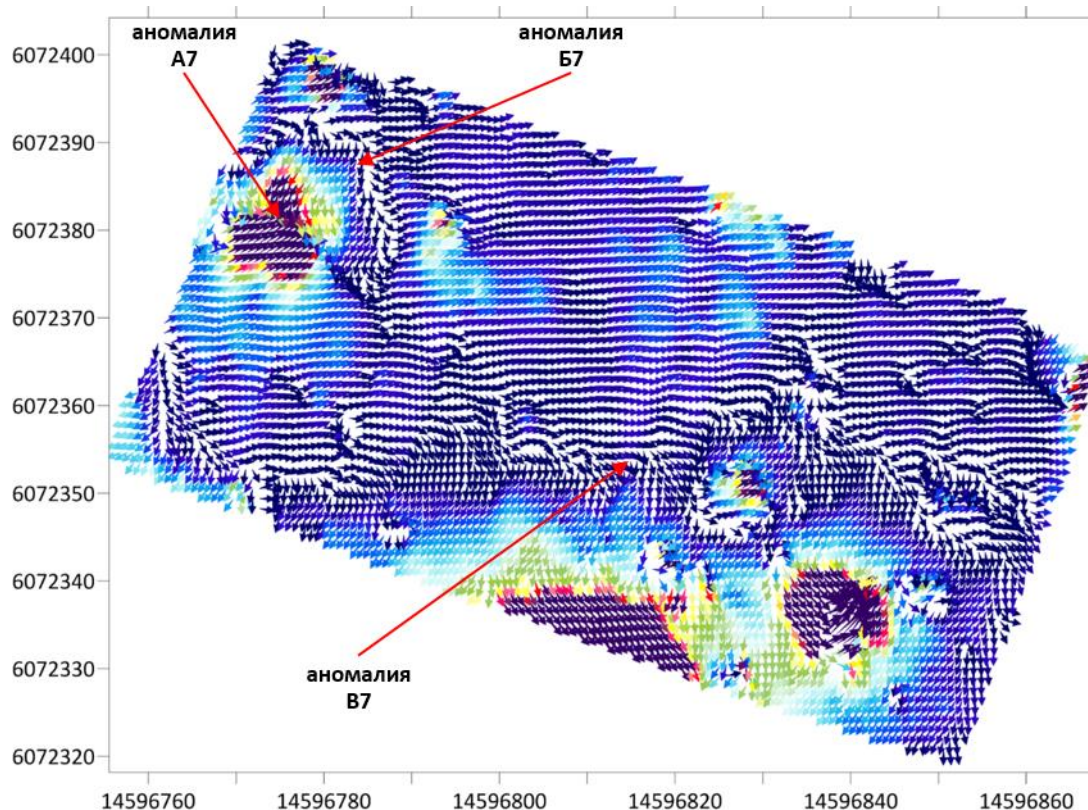


Рис. 4. Карта горизонтальной составляющей аномального ВМИ (высота полета 7 м)

На представленных картах хорошо выделяются три магнитных объекта (темно-синий цвет). Объект в северо-западном углу участка (аномалии ГВМИ А3 и А7) замыкается подковообразной аномалией ГВМИ (Б3 и Б7) резко отличного направления, обусловленной, по-видимому, нарушением однородности окружающей среды. Также на картах выделяются дугообразные аномалии В3 и В7, начинающиеся в юго-западном углу участка и заканчивающиеся в центре восточной границы. Сравнение площадей их распространения (В3 уже В7) указывает на то, что аномалиеобразующая структура расширяется на глубину и имеет существенно более сложный вид. Границы аномалиеобразующих структур проявляются на картах в виде узких зон, в пределах которых резко меняется направление векторов. Это может объясняться сменой направления остаточной намагниченности отложений, слагающих разные области исследуемого участка. Отметим также однородность аномальной ГВМИ при высоте съемки 3 м. Тогда как аномальная ГВМИ на высоте 7 м сильно неоднородная, что свидетельствует об относительно большей глубине залегания магнитных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанное программное обеспечение предоставляет возможность выделения компонент ВМИ из первичных данных, полученных при аэромагнитной съемке с борта БВС с использованием трехкомпонентного магнитометра без встроенной инерциальной системы. Дополнительный анализ векторных данных позволяет улучшить качество интерпретации и повысить степень детализации ранее изученных объектов. Разработанный способ построения карт горизонтальных проекций аномального ВМИ позволяет выполнить оперативную локализацию и оценить интенсивность их источников. По распределению модуля ВМИ хорошо выделяются скопления магнитных масс, а по линиям резкой смены

направления проекций ВМИ – зоны изменения вектора остаточной намагниченности пород, слагающих исследуемый район.

ЛИТЕРАТУРА

Злыгостев И.Н., Эпов М.И., Савлук А.В., Глинских В.Н. Многоканальная информационно-измерительная система на беспилотном воздушном судне для измерения полного вектора индукции магнитного поля земли // Геофизические технологии. – 2020. – Т. 4. – С. 50–57, doi: 10.18303/2619-1563-2020-4-50.

Инструкция по магниторазведке. Наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка. – Л.: Недра, 1981. – 263 с.

Савлук А.В., Злыгостев И.Н. Программа выделения вертикальной и горизонтальной компонент вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ) «ВЕКТОР-Т»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610472, заявка № 2018665035 от 24.12.2018, зарегистрировано 10.01.2019.

Blakely R.J. Potential theory in gravity and magnetic applications, Stanford-Cambridge program. – Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

Kosykh V.P., Gromilin, G.I., Firsov A.P., Savluk A.V. Errors of estimating the parameters of local magnetic anomalies based on magnetic survey performed at different altitudes by an unmanned aerial vehicle // Optoelectronics, Instrumentation and data processing. – 2018. – Vol. 54 (4). – P. 328–333, doi: 10.3103/S8756699018040027.

Le Maire P., Bertrand L., Munsch M., Diraison M., Géraud Y. Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: a new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale // Geophysical Prospecting. – 2020. – Vol. 68 (7). – P. 2307–2319, doi: 10.1111/1365-2478.12991.

Schmidt P.W., Clark D.A. The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization // The Leading Edge. – 2006. – Vol. 25 (1). – P. 75–78, doi: 10.1190/1.2164759.

Tuck L.E., Samson C., Laliberté J., Cunningham M. Magnetic interference mapping of four types of unmanned aircraft systems intended for aeromagnetic surveying // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. – 2021. – Vol. 10 (1). – P. 101–112, doi: 10.5194/gi-10-101-2021.

REFERENCES

Blakely R.J. Potential theory in gravity and magnetic applications, Stanford-Cambridge program. – Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

Instruction on magnetic prospecting (ground magnetic survey, aeromagnetic survey, hydromagnetic survey) // USSR Ministry of Geology [in Russian]. – Nedra, Leningrad, 1981. – 263 p.

Kosykh V.P., Gromilin, G.I., Firsov A.P., Savluk A.V. Errors of estimating the parameters of local magnetic anomalies based on magnetic survey performed at different altitudes by an unmanned aerial vehicle // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – Vol. 54 (4). – P. 328–333, doi: 10.3103/S8756699018040027.

Le Maire P., Bertrand L., Munsch M., Diraison M., Géraud Y. Aerial magnetic mapping with an unmanned aerial vehicle and a fluxgate magnetometer: a new method for rapid mapping and upscaling from the field to regional scale // Geophysical Prospecting. – 2020. – Vol. 68 (7). – P. 2307–2319, doi: 10.1111/1365-2478.12991.

Savluk A.V., Zlygostev I.N. “VECTOR-T” program for selecting the vertical and horizontal components of the Earth’s magnetic field induction vector: Certificate of the computer program state registration No. 2019610472, application No. 2018665035 from 24.12.2018, registered 10.01.2019 [in Russian].

Schmidt P.W., Clark D.A. The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization // The Leading Edge. – 2006. – Vol. 25 (1). – P. 75–78, doi: 10.1190/1.2164759.

Tuck L.E., Samson C., Laliberté J., Cunningham M. Magnetic interference mapping of four types of unmanned aircraft systems intended for aeromagnetic surveying // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. – 2021. – Vol. 10 (1). – P. 101–112, doi: 10.5194/gi-10-101-2021.

Zlygostev I.N., Epov M.I., Savluk A.V., Glinskikh V.N. Multichannel information-measuring system on an unmanned aircraft for measuring the total induction vector of the Earth’s magnetic field // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2020. – Vol. 4. – P. 50–57, doi: 10.18303/2619-1563-2020-4-50.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗЛЫГОСТЕВ Игорь Николаевич – старший научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка и создание автоматизированных информационно-измерительных систем геофизического и специального назначения.

ЭПОВ Михаил Иванович – д.т.н., академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; управляющий директор СНИИГГиМС. Основные научные интересы: теория и моделирование электромагнитных полей в многомасштабных гетерогенных геологических средах, мониторинг верхних частей земной коры в целях экологии, инженерной геологии и археологии.

САВЛУК Андрей Васильевич – ведущий инженер лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: анализ и обработка многомерных сигналов, графических изображений, программирование.

*Статья поступила в редакцию 27 декабря 2021 г.,
принята к публикации 8 февраля 2022 г.*