



Краткое сообщение

УДК 550.380

<https://elibrary.ru/clamag><https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>

Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки

Н.В. Снегирёв^а, С.В. Гаченко^б, А.В. Паршин^с^{а-с}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^сИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме. Предметом представленного исследования являлся вопрос о степени снижения информативности геофизических данных при переходе от наземных съемок к маловысотной геофизической разведке с применением беспилотных летательных аппаратов. В ходе работы был проведен сравнительный анализ информативности результатов съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов и наземной магнитной съемки. По итогам исследования приведены наблюдаемые значения магнитного поля, полученные обеими методиками сбора в пределах одной площади, и конечные информационные продукты – результаты фильтрации и трехмерной инверсии данных. Показано, что при визуальном анализе карт полного вектора напряженности магнитного поля возникает впечатление о более низкой информативности магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов, однако после обработки данных итоговые информационные продукты характеризуются идентичной информативностью. Это касается как результатов трехмерного моделирования эффективной магнитной восприимчивости, так и карт и графиков аномального магнитного поля после фильтрации в скользящем окне. Также показано негативное влияние геологической помехи от моренных отложений на наземные данные. Локальные магнитные аномалии по результатам съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов могут уверенно коррелировать с аномалиями наземной съемки, причем собираемые в ходе проведения маловысотной аэромагниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов данные имеют меньшую вероятность получения ошибки. Выводы относятся к конкретному случаю и не могут быть однозначно транслированы на любые геологические ситуации, однако авторы считают, что данный пример достаточно типичен.

Ключевые слова: магниторазведка, беспилотная аэрогеофизика, магнитная восприимчивость, трехмерное моделирование геологической среды

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-67-47037.

Для цитирования: Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 182–189. <https://elibrary.ru/clamag>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>.

Brief report

Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey

Nikita V. Snegirev^а, Sergey V. Gachenko^б, Alexander V. Parshin^с^{а-с}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^сA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The subject of the study is the problem of the decline degree of the information content of geophysical data when switching from land surveys to low-altitude geophysical survey using unmanned aerial vehicles. The research involves a comparative analysis of the information content of the unmanned aerial vehicle survey results and those of the



land magnetic survey. The conducted research allowed to present the observed values of the magnetic field obtained by both survey methods within the same area as well as the final information products in the form of the results of filtering and three-dimensional data inversion. It is shown that visual analysis of maps of the full vector of magnetic field strength gives the impression of a lower information content of magnetic survey performed by unmanned aerial vehicles. However, the data having been processed create final information products of identical information content. This concerns both the results of three-dimensional modeling of the effective magnetic susceptibility, and maps and plots of the anomalous magnetic field after filtering in a sliding window. The negative impact of geological interference from morainic deposits on ground data is also shown. Local magnetic anomalies based on unmanned aerial vehicle survey results can confidently correlate with land survey anomalies, whereas the data collected during low-altitude aeromagnetic survey using unmanned aerial vehicles have a lower error probability. The conclusions refer to a specific case and cannot be unambiguously applied to any geological situation, however, the authors believe in the typicality of this example.

Keywords: magnetic survey, unmanned airborne geophysics, magnetic susceptibility, three-dimensional modeling of geological environment

Funding: The work was funded by the Russian Science Foundation grant no. 20-67-47037.

For citation: Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V. Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):182-189. (In Russ.). <https://elibrary.ru/clamag>, <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>.

Введение

На сегодняшний день наиболее современным способом выполнения магниторазведки является сбор данных с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В качестве ключевого преимущества беспилотных съемок можно обозначить оперативный сбор данных даже в условиях сложного ландшафта. В то же время, поскольку аномалии магнитного поля с высотой затухают, возникает вопрос о возможной потере информации и пропуске относительно небольших, но значимых геологических объектов. Здесь необходимо отметить, что делать выводы о полноте информации на основе сопоставления первичных результатов магнитной съемки – карт модуля полного вектора напряженности магнитного поля, по нашему мнению, бессмысленно, так как такие карты характеризуют совокупный сигнал от всей геологической среды на глубины до десятков километров, а при решении большинства реальных задач геологической разведки интерес представляет только ее верхняя часть. Для получения информации, характеризующей приповерхностную часть разреза, применяют локальные трансформации и решение обратных задач, что позволяет на качественном или количественном уровне выделить небольшие аномалеобразующие структуры. В связи с этим в данной работе мы сравниваем именно результаты фильтрации и инверсии данных наземной и БПЛА магнитных съемок, а не полное поле. Безусловно, один пример не может претендовать на универсальность вы-

водов, но, на наш взгляд, представленный материал является очередным наглядным примером в пользу доказательства принципиальной возможности отказа от наземных съемок во многих геологических ситуациях.

Материалы и методы исследования

На участке недр в одном из горных районов Восточной Сибири выполнена БПЛА- и наземная магниторазведка. И наземная, и БПЛА-съемка выполнялись с шагом между профилями в 20 м, однако направление профилей несколько отличалось. Пешеходная съемка выполнялась в движении с постоянной записью значений раз в три секунды по заранее подготовленным профилям. БПЛА-съемка выполнялась при помощи комплекса SibGIS UAS [1] (рис. 1) на высоте 44 м под датчиком магнитометра с частотой измерений 2 Гц при скорости полета 8 м/с. Предел систематической погрешности магнитометрического канала БПЛА-системы – 0,5 нТл, чувствительность – 0,015 нТл.

Съемка выполнялась с детальным обтеканием рельефа с погрешностью удержания высоты 10 % от плановой. В обоих случаях применялись высокоточные протонные магнитометры.

Результаты исследования и их обсуждение

Карты первичных данных приведены на рис. 2.



Рис. 1. Беспилотная аэрогеофизическая система SibGIS UAS в варианте для магнитной съемки
Fig. 1. Unmanned airborne geophysical system SibGIS UAS in the magnetic survey version

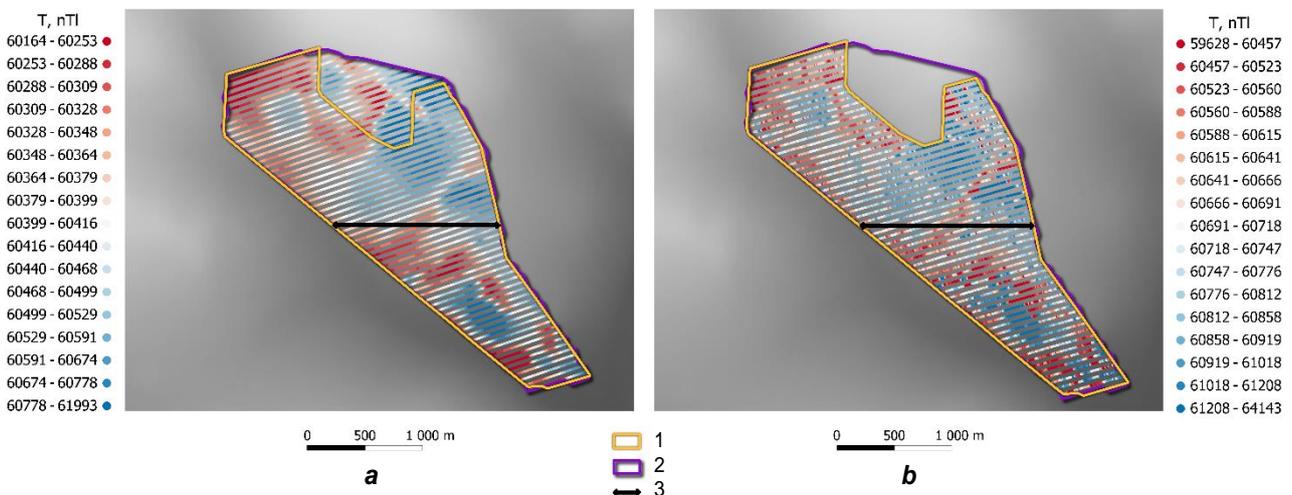


Рис. 2. Схемы наблюдаемых значений магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов (а) и наземной магниторазведки (б) с указанием линии профиля 1:

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата; 3 – линия профиля

Fig. 2. Diagrams of observed values of magnetic survey using unmanned aerial vehicles (UAV) (a) and land magnetic survey (b) indicating the profile 1 line:

1 – land survey; 2 – UAV-based survey; 3 – profile line

По данным съемки с БПЛА, интенсивные локальные аномалии заметно затухают, что объясняется удалением магнитометра от намагниченного геологического тела при производстве измерений на высоте полета (см. рис. 2, а). При выходах тел на поверхность разность удаленности для наземного измерительного прибора и БПЛА может достигать сотен раз. Принимая затухание магнитного поля

при удалении от его источника пропорционально квадрату расстояния, будем иметь кратное уменьшение фиксируемых локальных магнитных аномалий. Таким образом, при рассмотрении первичных данных наземной и БПЛА-съемки создается впечатление, что первая является более предпочтительной с позиции информативности. Тем не менее следует отметить высокую дисперсию данных



наземной съемки, вызванную моренными отложениями, не имеющими однородной намагниченности. Этот фактор можно считать геологической помехой.

Выделим локальную компоненту из данных магнитной БПЛА-съемки. Для решения задачи воспользуемся осреднением поля в скользящем окне радиусом 70 м, а затем вычтем наблюдаемое поле из осредненного. В данных наземной съемки интенсивность локальных аномалий значительно превосходит интенсивность регионального фона, поэтому оставляем данные наземной съемки без изменений. Сопоставление графиков наземной съемки с графиками локальных аномалий, фиксированными БПЛА-измерениями, показано на рис. 3, *b*.

Сравнение графиков наземной и БПЛА-съемки осложнено различным плановым расположением сети наземных профилей и маршрутов БПЛА, различиями в шаге наблюдений, в связи с этим сравнение производится путем переинтерполяции данных на общий

профиль. В итоге неизбежно возникают ошибки интерполяции, приводящие к искажению исходных кривых. Небольшие имеющиеся погрешности в равной мере будут относиться как к той, так и к другой съемке. Однако в целом можно достаточно уверенно констатировать, что все основные экстремумы аномалий, даже незначительные, заметны при обоих способах съемки, в связи с чем информативность получаемых данных является примерно аналогичной. Оказывается, что в БПЛА-данных, полученных на высоте в несколько десятков метров, содержится вся основная информация, пусть и на уровне аномалий в первые нанотесла, которые тем не менее вполне удастся выделить в результате фильтрации. Таким образом, карты аномального поля, являющиеся одним из основных информационных материалов для геологической интерпретации, по факту имеют одинаковое информационно-картографическое содержание, фиксируют одни и те же геологические объ-

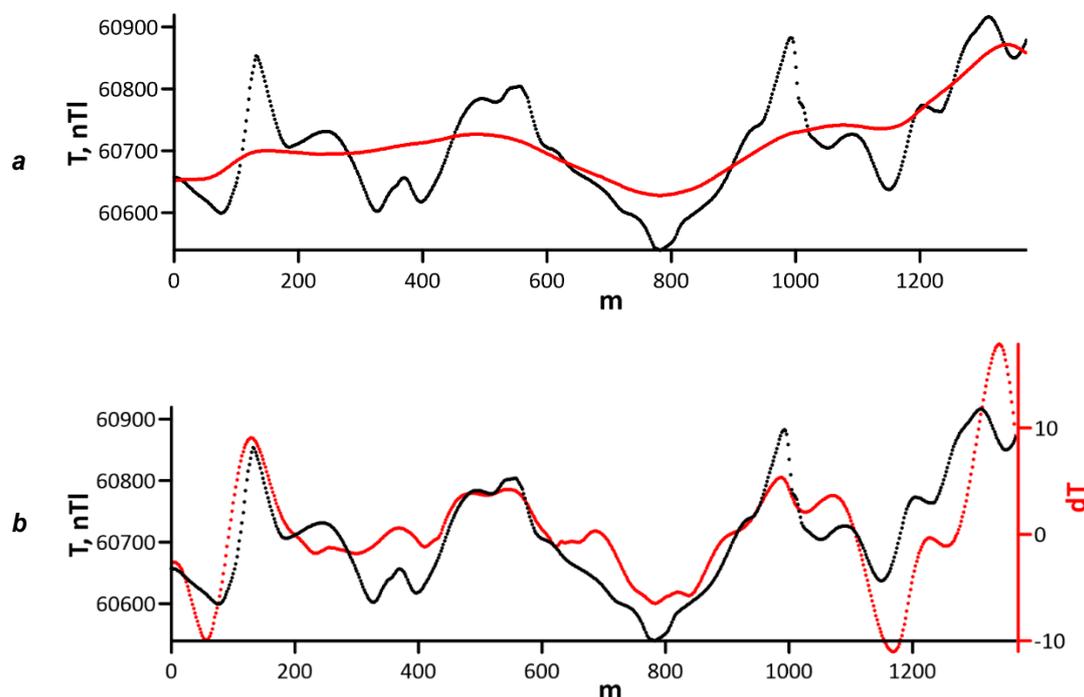


Рис. 3. Графики для профиля 1:

a – полный вектор для наземной магнитной съемки (черного цвета) и съемки с применением беспилотных летательных аппаратов (красного цвета); *b* – полный вектор для наземной магнитной съемки (черного цвета) и локальная составляющая по данным съемки с применением беспилотных летательных аппаратов (красного цвета)

Fig. 3. Graphs for profile 1:

a – full vector for land magnetic survey (black) and unmanned aerial vehicle (UAV) survey (red);
b – full vector for the land magnetic survey (black) and the local component according to the UAV-based survey data (red)

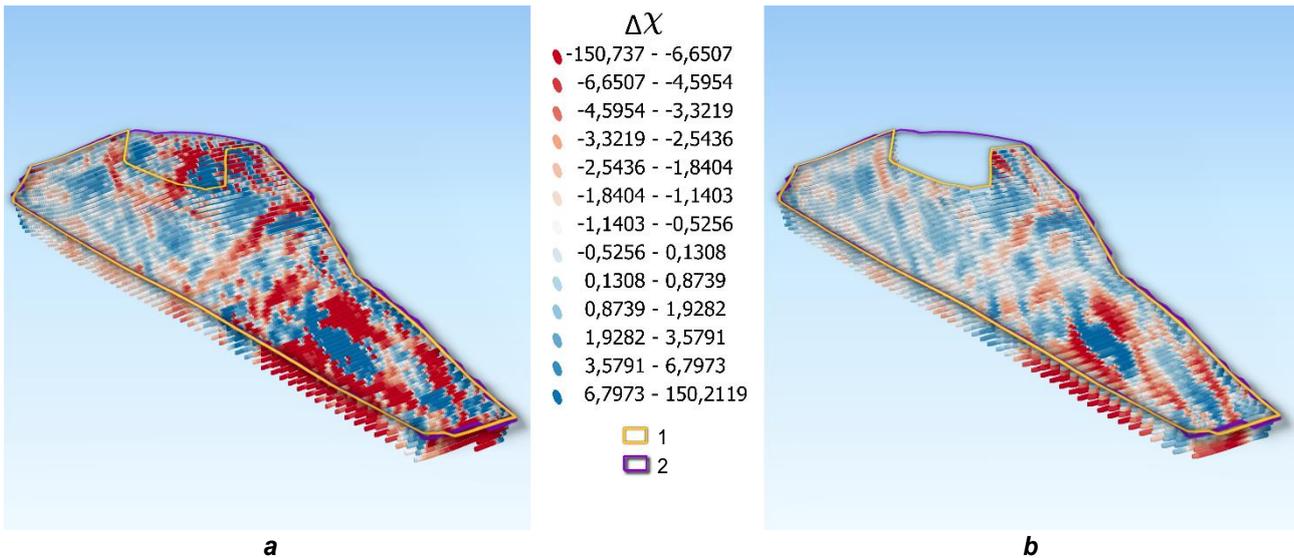


Рис. 4. Трехмерные модели кажущейся магнитной восприимчивости по данным магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов (а) и пешеходной магниторазведки (б):

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата

Fig. 4. 3D models of apparent magnetic susceptibility according to the magnetic survey data using unmanned aerial vehicles (UAV) (a) and walking magnetic survey (b):

1 – land survey; 2 – UAV-based survey

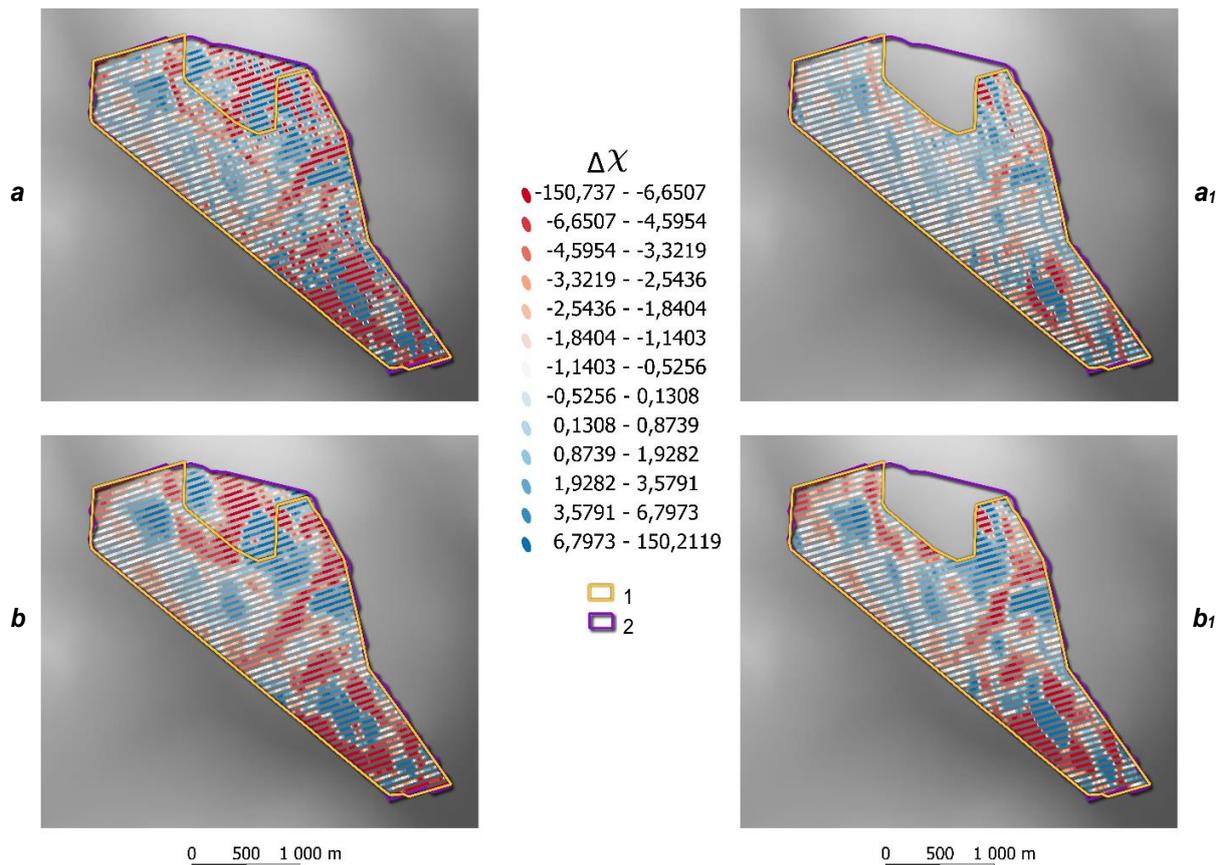


Рис. 5. Срезы кажущейся магнитной восприимчивости согласно съемке с применением беспилотных летательных аппаратов (слева) и наземной съемке (справа):

а, а₁ – 0–25 м; б, б₁ – 25–50 м:

1 – наземная съемка; 2 – съемка с помощью беспилотного летательного аппарата

Fig. 5. Sections of apparent magnetic susceptibility according to the unmanned aerial vehicle (UAV) survey (left) and land survey (right):

а, а₁ – 0–25 m; б, б₁ – 25–50 m:

1 – land survey; 2 – UAV-based survey



Сравнению первичных данных наземных и БПЛА-съемок и их трансформант посвящено некоторое количество публикаций [2–4 и др.]. В существенно меньшем количестве работ [5] изучаются возможности наземной и БПЛА-магнитной съемки при интерпретации их данных с помощью 3D-инверсии, хотя такой подход, позволяющий перейти от параметров поля к кажущимся параметрам геологической среды, является современным и востребованным. По полученным данным методом Ос-сам [6] были построены две трехмерные модели магнитной восприимчивости горных пород (рис. 4).

На рис. 5 приведены срезы эффективной магнитной восприимчивости для горизонтов 0–25 и 25–50 м.

Из рис. 4 и 5 заметно, что наибольшие отличия наблюдаются в самом верхнем слое полученной 3D-модели (где в данных наземной съемки максимально проявлена геологическая помеха, которая на высоте более 40 м уже не ощущается). Следующий срез на глубине 25–50 м практически тождественен. Все основные объекты геометризованы по данным обоих методов, таким образом, можно

констатировать, что при одинаково высоком качестве съемки результаты инверсии, за исключением самого приповерхностного слоя, на практике оказались одинаково информативными.

Заключение

Приведенный пример показывает, что на практике полнота информации, которую можно получить из данных БПЛА- и наземной съемки, может быть аналогичной. Это справедливо как в случае обработки данных БПЛА-съемки методами фильтрации, так и при применении методов 3D-инверсии. Максимальные отличия возможны в самой верхней части разреза, поскольку удаленность прибора на несколько десятков метров от поверхности земли сводит на нет помехи, вызванные хаотично ориентированными обломками магнитных горных пород, глыбами, скрытыми в почвенном слое. В ряде случаев это может быть достоинством. Безусловно, данный пример не является всеобъемлющим, но представляется, что в реальной геологопоисковой практике результат в большинстве случаев будет примерно таким же.

Список источников

1. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. <https://elibrary.ru/xqzrbr>, [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)).

2. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-Spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

3. Schmidt V., Becken M., Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site // First Break. 2020. Vol. 38. Iss. 8. P. 61–66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020061>.

4. Cunningham M., Samson C., Laliberté J., Goldie M., Wood A., Birkett D. Comparison between ground, helicopter, and unmanned aircraft system magnetic datasets: a case study from the Abitibi Greenstone Belt, Canada // Pure and Applied Geophysics. 2022. Vol. 179. P. 1871–1886. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03025-9>.

5. Tereshkin S., Davydenko S., Davydenko Y., Davydenko A., Parshin A., Snopkov S. UAVs and ground-based geophysical surveys and 3D inversion when studying archeological objects in Baykal Region // Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2021: 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2021. Vol. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120256>.

6. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // Geophysics. 1987. Vol. 52. Iss. 3. P. 289–300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.

References

1. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore

deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). <https://elibrary.ru/xqzrbr>, [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)).



2. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

3. Schmidt V., Becken M., Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site. *First Break*. 2020;38(8):61-66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020061>.

4. Cunningham M., Samson C., Laliberté J., Goldie M., Wood A., Birkett D. Comparison between ground, helicopter, and unmanned aircraft system magnetic datasets: a case study from the Abitibi Greenstone Belt, Canada. *Pure*

and Applied Geophysics. 2022;179:1871-1886. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03025-9>.

5. Tereshkin S., Davydenko S., Davydenko Y., Davydenko A., Parshin A., Snopkov S. UAVs and ground-based geophysical surveys and 3D inversion when studying archeological objects in Baykal Region. *Near Surface Geoscience Conference & Exhibition 2021: 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2021;2021:1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120256>.

6. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*. 1987;52(3):289-300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.

Информация об авторах / Information about the authors



Снегирёв Никита Владимирович,

младший научный сотрудник департамента геоинформатики, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, nsnegirev@geo.istu.edu

Nikita V. Snegirev,

Junior Researcher of the Geoinformatics Department, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, nsnegirev@geo.istu.edu



Гаченко Сергей Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук, руководитель департамента геоинформатики, институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, gsvgeo@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>

Sergey V. Gachenko,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Head of the Geoinformatics Department, Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, gsvgeo@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>



Паршин Александр Вадимович,

кандидат геолого-минералогических наук, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия, научный сотрудник Лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия, sarhin@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>



Alexander V. Parshin,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Scientific Director of the Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Methods of Prospecting,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ sarhin@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.05.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 21.06.2023.

The article was submitted 18.05.2023; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 21.06.2023.