



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-993>

УДК 550.839



Аэромагнитная разведка с применением беспилотного летательного аппарата при прогнозировании медно-молибденового рудопоявления Каргоба

Г.Б. Оразбекова¹  , И.Е. Матайбаева²  , Н.А. Зимановская²   ,
А.А. Рагданова² , А.С. Сарсембаева¹  

¹ Университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан

² Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

✉ nzimanovskaya@edu.ektu.kz

Аннотация

Участок рудопоявления Каргоба (Восточный Казахстан) площадью 25,5 км² характеризуется сильно расчленённым горным рельефом с абсолютными отметками 800–1013 м. В работе представлена методика высокодетальной аэромагнитной съёмки с использованием беспилотного летательного аппарата для прогноза медно-молибденового оруденения. Цель исследования – выявление геофизических критериев рудоконтроля и уточнение границ перспективных зон. Съёмка выполнялась квадрокоптером DJI Matrice 300 RTK с квантовым магнитометром Geoshark MG30GM, проведена 3D-интерпретация магнитного поля с применением производных трансформант (TDR, VDR, THDR). В результате выделено шесть аномальных зон, из которых наиболее перспективной является зона А2 с амплитудой до 500 нТл и пространственной связью с гранодиоритовой интрузией. Уточнены критерии прогнозирования порфирового оруденения: амплитуда 200–500 нТл, горизонтальные градиенты свыше 3 нТл/м, протяжённость аномальных зон 0,5–2 км, сопряжённость положительных и отрицательных аномалий и их корреляция с зонами гидротермальных изменений. Сравнение выявленных аномалий с данными зарубежных исследований района Лаврион (Греция) подтвердило правильность выбранного метода. Ключевой особенностью здесь выступает сочетание разнознаковых аномалий, которое отражает структурно-геологические особенности контроля оруденения. Высокое разрешение магнитной съёмки на участке Каргоба позволяет точно локализовать рудные зоны и оптимизировать расположение разведочных скважин. Применение БПЛА значительно упрощает и ускоряет обследование труднодоступного горного района: сокращаются сроки выполнения магнитной съёмки и снижается её стоимость по сравнению с традиционными наземными маршрутами и пилотируемой авиацией, при этом обеспечивается сопоставимое или более высокое качество данных. Таким образом, предложенный подход позволяет решать задачи поисков скрытых рудных тел с меньшими затратами и рисками, расширяя возможности геологоразведки в удалённых районах.

Ключевые слова

порфировое месторождение, геологоразведка, прогнозирование рудных тел, медно-молибденовое рудопоявление, магнитная аномалия, аэромагнитная съёмка, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), Восточный Казахстан

Финансирование

Статья выполнена в рамках грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024–2026 годы (Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан) № AP23484205 «Анализ спектральных характеристик спутниковых и наземных данных с целью локализации поиска редкометалльного оруденения в пределах Центральной Калбы».

Для цитирования

Orazbekova G.B., Mataibayeva I.E., Zimanovskaya N.A., Ragdanova A.A., Sarsembayeva A.S. UAV-based aeromagnetic surveying for exploration targeting at the Kargoba copper-molybdenum occurrence. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(2):107–121. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-993>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

UAV-based aeromagnetic surveying for exploration targeting at the Kargoba copper-molybdenum occurrence

G.B. Orazbekova¹  , I.E. Mataibayeva²  , N.A. Zimanovskaya²   ,
A.A. Ragdanova² , A.S. Sarsembayeva¹  

¹ *Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan*

² *D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan*

 nzimanovskaya@edu.ektu.kz

Abstract

The Kargoba mineral occurrence in East Kazakhstan covers an area of 25.5 km² and is characterized by rugged mountainous terrain at elevations of 800–1,013 m above sea level. This study presents a methodology for high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV)-based aeromagnetic surveying aimed at targeting copper-molybdenum mineralization. The study sought to identify geophysical targeting criteria and refine the boundaries of prospective zones. The survey was conducted using a DJI Matrice 300 RTK quadcopter equipped with a Geoshark MG30GM quantum magnetometer. Magnetic-field interpretation included derivative-based transforms, namely the tilt derivative (TDR), first vertical derivative (VDR), and total horizontal derivative (THDR), as well as three-dimensional modeling of magnetic sources. Six anomalous zones were delineated. Zone A-2 was identified as the highest-priority exploration target, exhibiting an anomaly amplitude of up to 500 nT and a spatial association with a granodiorite intrusion. The following criteria were established for targeting porphyry mineralization: anomaly amplitudes of 200–500 nT, horizontal gradients exceeding 3 nT/m, anomaly strike lengths of 0.5–2 km, spatial association of positive and negative magnetic anomalies, and spatial correlation with hydrothermal alteration zones. Comparison of the identified anomalies with published data from the Lavrion district in Greece supported the applicability of the selected approach. A key diagnostic feature is the spatial association of anomalies of opposite polarity, reflecting the structural and geological controls on mineralization. The high spatial resolution of the aeromagnetic survey at Kargoba enables more precise delineation of prospective mineralized zones and more effective positioning of exploration drillholes. The use of a UAV considerably facilitates and accelerates surveying in rugged and inaccessible terrain. Compared with conventional ground surveys and crewed airborne surveys, it reduces survey time and costs while maintaining high data quality. The proposed approach therefore offers a cost-effective, lower-risk means of targeting concealed mineralized bodies and extends the capabilities of mineral exploration in remote regions.

Keywords

porphyry mineralization, mineral exploration, exploration targeting, copper-molybdenum occurrence, magnetic anomaly, aeromagnetic survey, unmanned aerial vehicles (UAVs), East Kazakhstan

Funding

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant No. AP23484205 for 2024–2026, awarded for the project “Spectral Analysis of Satellite and Ground-Based Data for Locating Rare-Metal Mineralization in the Central Kalba Area”.

For citation

Orazbekova G.B., Mataibayeva I.E., Zimanovskaya N.A., Ragdanova A.A., Sarsembayeva A.S. UAV-based aeromagnetic surveying for exploration targeting at the Kargoba copper-molybdenum occurrence. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026;11(2):107–121. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-993>

Введение

Проблема эффективного прогнозирования скрытых рудных тел в труднодоступных районах остаётся актуальной задачей современной геологоразведки [1]. Традиционные методы аэромагнитной съёмки с пилотируемыми летательными аппаратами сопряжены с существенными ограничениями – высокой стоимостью, сложной логистикой и недостаточным пространственным разрешением данных в сложном рельефе. Одним из направлений, позволяющих преодолеть эти ограничения, является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с интегрированными высокочувствительными магнитометрами [2]. Этот подход получил развитие в последние

годы и позволил значительно повысить точность и детальность аэромагнитных исследований [3–5].

Однако несмотря на очевидные преимущества БПЛА существует ряд методологических и технических вызовов: адаптация маршрутов к сложному рельефу, влияние электромагнитных помех от самого дрона, точное позиционирование и соблюдение высоты полёта [4]. Кроме того, интерпретация высокоточных магнитных данных требует алгоритмов и программных решений, обеспечивающих выделение и корректную трактовку аномалий различной природы [6, 7].

Аналогичные задачи по пространственному анализу и прогнозированию полезных ископаемых с использованием компьютерного моделирования



успешно решаются и для других типов сырья. В частности, применительно к нерудным полезным ископаемым (общераспространенным видам сырья) на примере кайнозойских отложений Брестской области разработана методика ГИС-моделирования, позволяющая выполнять прогноз залежей и оценивать приемлемость их освоения с учетом геологических и земельных факторов [8].

Параллельно с развитием геофизических методов прогнозирования активно совершенствуются и методы автоматизированного минералогического анализа. В частности, разработаны подходы к сегментации рудных минералов на фотоизображениях аншлифов с использованием свёрточных нейронных сетей, позволяющие достичь высокой точности идентификации минеральных фаз [9]. Это свидетельствует об общей тенденции перехода геологоразведочных исследований к количественным, воспроизводимым и автоматизированным методам обработки данных.

Таким образом, цель настоящей работы – создание и апробация комплексной методики, объединяющей высокодетальную аэромагнитную съёмку с БПЛА, современные методы обработки и интерпретации данных, с учётом геологических особенностей рудопроявления Каргоба.

Для достижения цели выполнены следующие задачи: аэромагнитная съёмка участка с использованием БПЛА; обработка характеристик магнитного поля; построение объёмной модели намагниченности до глубины 500 м; выделение и классификация аномальных зон; обоснование приоритетных участков для дальнейших поисковых работ.

Методология

Метод аэромагнитной разведки основан на регистрации вариаций напряжённости магнитного поля Земли, вызванных различиями в магнитной восприимчивости горных пород. Согласно теории потенциала источники аномалий можно моделировать с помощью эквивалентных тел в трёхмерном пространстве, что позволяет применять фильтрационные и инверсные подходы для восстановления структуры объекта¹.

Применение метода оправдано в районах с развитой магматической активностью, где существуют рудоносные интрузии, как, например, в районе Каргоба. Основываясь на моделях порфировых систем, можно говорить о том, что гидротермально-метасоматические зоны вблизи апикальных частей интрузий являются геофизически контрастными и могут быть эффективно локализованы средствами аэромагнитки [10].

Выбор аэромагнитной съёмки с БПЛА обусловлен необходимостью получения высокодетальной картины магнитного поля в условиях труднодоступного для традиционной пилотируемой съёмки рельефа [11].

Использование квантового магнитометра и алгоритмов анализа (редукция к полюсу, вертикальные

и горизонтальные градиенты, TDR и пр.) опирается на методику, апробированную в ряде зарубежных исследований [12–14].

Обработка данных аэромагнитной съёмки выполнена в два этапа. Непосредственно в полевых условиях проводились первичная (оперативная) обработка и оценка качества полевого материала, окончательная камеральная обработка – после завершения полевых работ. Для обработки и текущего контроля качества работ использовался пакет программ Geosoft Oasis Montaj².

Вклад авторов заключается в адаптации известной методики к условиям горного рельефа Восточного Казахстана, модификации алгоритма интерпретационной томографии (3D-модель в Voxler) под параметры мелкомасштабного съёмочного блока, а также в обосновании критериев выделения перспективных аномалий на основе сопоставления с известными месторождениями аналогичного типа.

Оборудование и методика

В качестве авиационного носителя при проведении аэромагнитной съёмки использовался БПЛА мультироторного типа – квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK³.

Программное обеспечение UgCS Pro⁴ предназначено для подготовки полётного задания, контроля и управления БПЛА и отображения телеметрической информации, поступающей от БПЛА.

В качестве бортового магнитометра использовался квантовый магнитометр Geoshark MG30GM [15].

Первичная обработка выполнялась без отставания от полевых работ, ежедневно по возвращении отряда к месту полевого базирования. В компьютер для обработки переносилась информация с бортового магнитометра и МВС. Данные импортировались в базы Geosoft OM, редактировались (обрезка интервалов полёта на профиль и разворотов между профилями), выполнялся визуальный контроль полноты и качества исходных данных, формировалась пополняемая предварительная карта магнитного поля.

Для визуального контроля качества получаемых данных по каждому маршруту магнитной съёмки средствами БД Geosoft OM отображались диаграммы измеренных значений индукции магнитного поля (Ta), модели нормального магнитного поля (IGRF) с учётом высотной отметки магнитометра, вариации геомагнитного поля (MVS_RMg), альтитуд рельефа поверхности земли (SRTM) и магнитометра (Elev_Mg_27m). Пример визуализации элементов базы данных представлен на рис. 1.

Оценка погрешности магнитной съёмки выполнена на основе сопоставления контрольных (повторных) измерений с рядовыми, а также анализа невязок магнитного поля на пересечениях рядовых маршрутов с секущими и приведена в табл. 1.

² Seequent. Oasis montaj. URL: <https://www.seequent.com/products-solutions/oasis-montaj/>

³ DJI. Matrice 300 RTK. URL: <https://www.dji.com/support/product/matrice-300>

⁴ SPH Engineering. UgCS User Manual. URL: <https://manuals.ugcs.com/>

¹ Отчет о геологическом доизучении с оценкой прогнозных ресурсов листов L-44-V, XI, XVII (казахстанская часть). ТОО «Капчагайская геолого-производственная экспедиция». Алматы; 2016. Отв. исп. А.В. Дубинкин, А.К. Ахматолла, В.В. Подковыров и др.

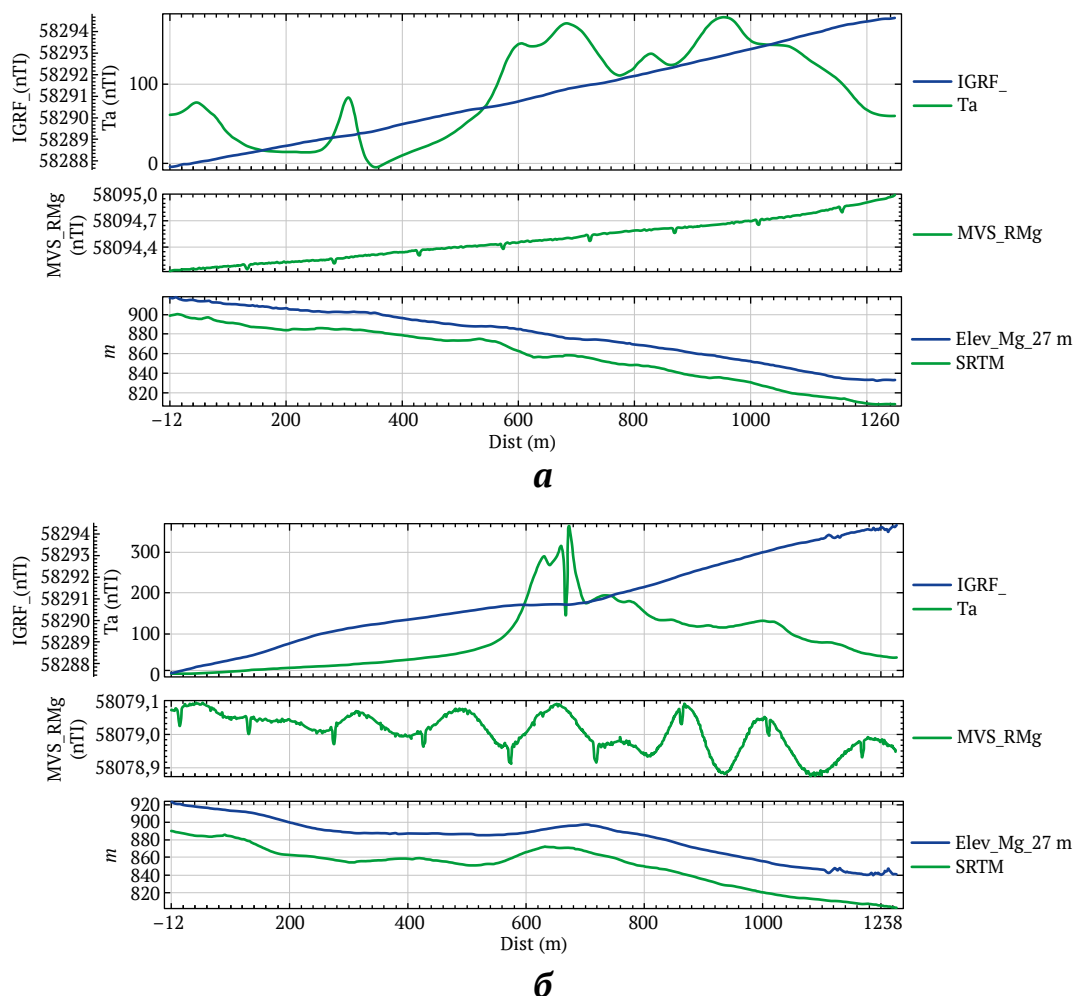


Рис. 1. Пример визуализации элементов базы данных аэромагнитной съемки, маршруты 1034 (а), 1042 (б)

Объём контрольных измерений составил 14,9 пог. км, или 6,2 % от общего объёма рядовых и связующих маршрутов при 5 %, предусмотренных ТЗ. Погрешность магнитной съёмки участка Каргоба по данным обработки измерений на контрольных маршрутах составила $\pm 2,99$ нТл (требование ТЗ ± 5 нТл, а в условиях сильноградиентного поля ± 7 нТл). На рис. 2 показаны два наиболее характерных профиля. Профиль L1036 отражает положительную аномалию с амплитудой около 200 нТл, а профиль L1087 – аномалию высокой интенсивности до 500 нТл.

Оценка погрешности аэромагнитной съёмки по точкам пересечения связующих маршрутов с рядовыми для точек с горизонтальным градиентом менее 50 нТл/км выполнена по формуле среднеквадратической погрешности

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n \delta_i^2}{2(n-1)}},$$

где δ_i – разности ординат окончательных значений ΔT в точках пересечения, нТл; n – число разностей δ .

По результатам анализа значений магнитного поля на 485 пересечениях среднеквадратическая погрешность составила $\pm 3,46$ нТл.

По результатам камеральной обработки сформирована финальная база магнитометрических данных, вычислены сетки аномального магнитного поля и его наиболее информативных трансформант.

Графические образы перечисленных карт магнитного поля и наиболее информативных его трансформант приведены на рис. 3–9.

Таблица 1

Оценка погрешности магнитной съёмки по данным измерений на контрольных маршрутах

№	Линия	Дистанция, м	Среднее значение разности, нТл	Стандартное отклонение, нТл
1	L1036:0	1231	0,24	$\pm 2,23$
2	L1087.2:0	1844	2,04	$\pm 4,53$
3	L1092.2:0	2122	-0,28	$\pm 1,00$
4	L1093.2:0	2236	0,37	$\pm 0,38$
5	L1101.2:0	1450	0,27	$\pm 0,44$
6	L1113:0	1761	-3,34	$\pm 5,48$
7	L1122:0	2145	-0,23	$\pm 0,94$
8	L1123:0	2113	0,68	$\pm 1,52$
Всего		14903	0	$\pm 2,99$

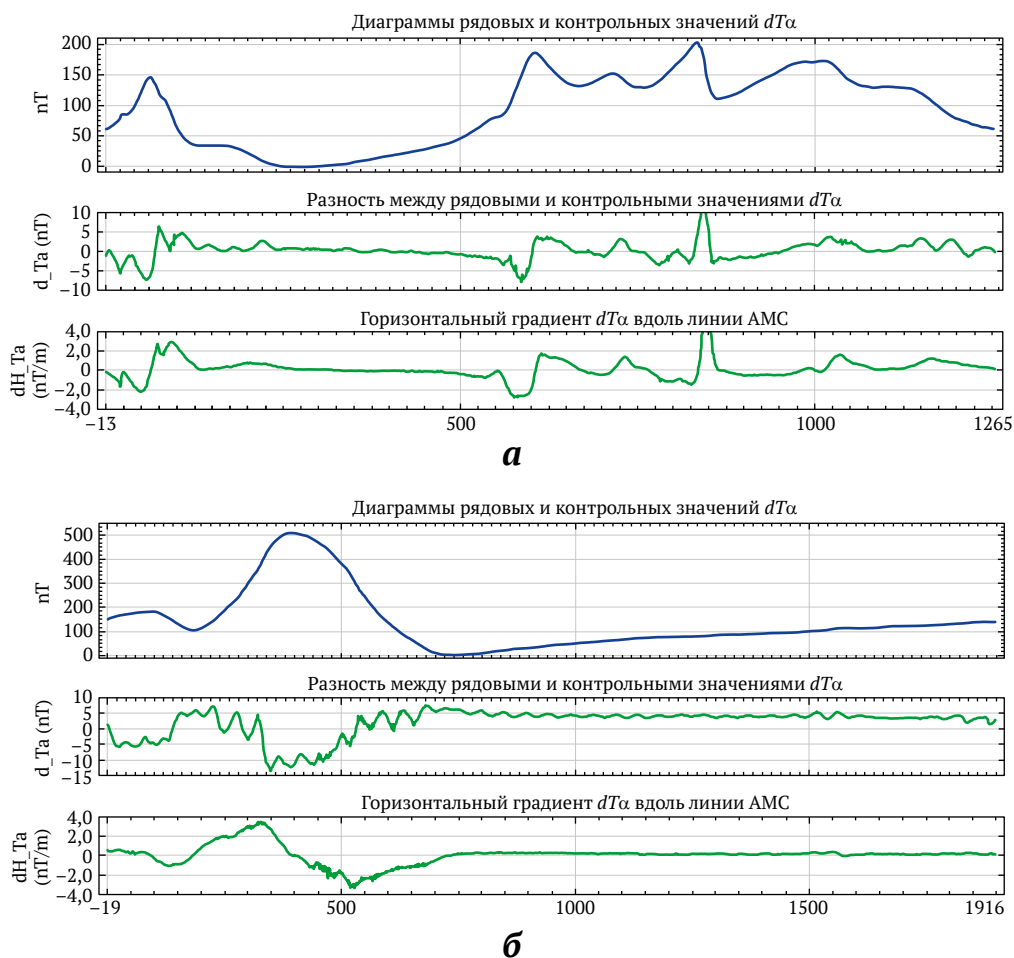


Рис. 2. Сопоставление рядовых и контрольных измерений магнитного поля для двух характерных профилей: L1036 – с положительной аномалией средней амплитуды (а) и L1087 – с аномалией высокой амплитуды (б)

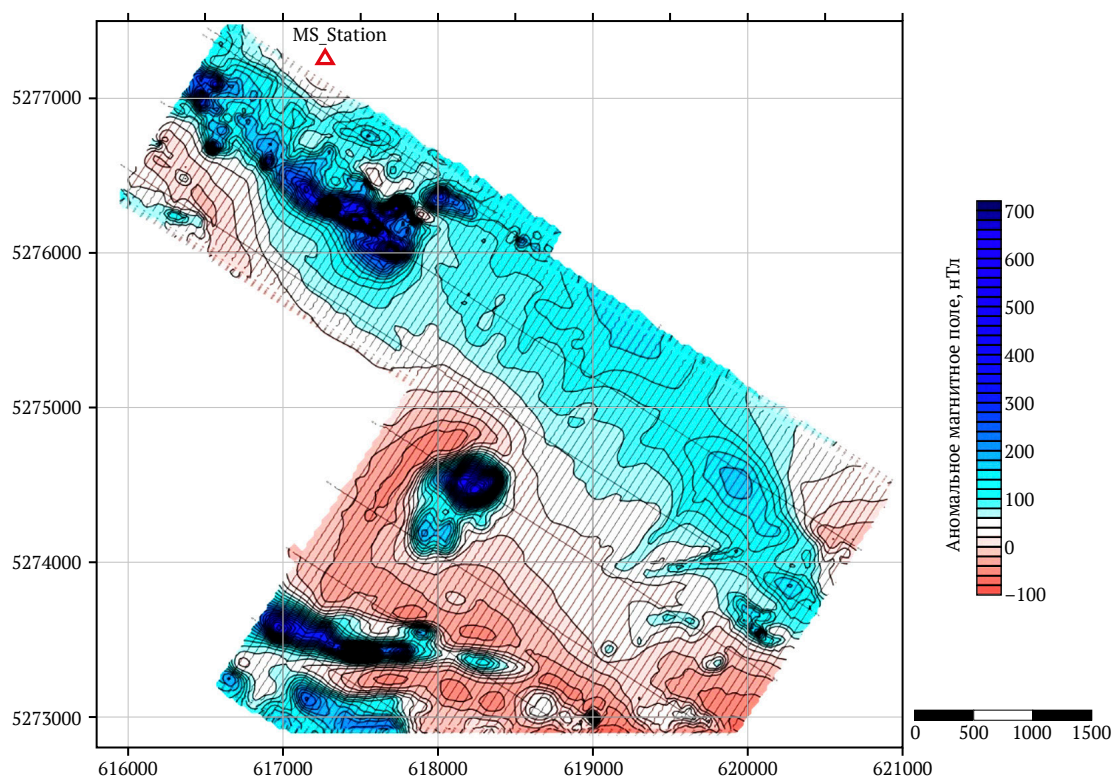


Рис. 3. Контурная карта аномального магнитного поля

На рис. 3 представлена модель аномального магнитного поля участка Каргоба в виде карты изодинам, построенной средствами программы Surfer.

Карта раскрашена в соответствии с инструктивными требованиями гаммой оттенков красного (отрицательные значения аномального магнитного поля) и синего (положительные значения) цвета.

Для первичной оценки качества и однородности распределения аномального магнитного поля использовалась карта графиков, отображающая амплитуду и характер изменения значений ΔT по маршрутам наблюдений. Анализ распределения аномалий позволил выделить зоны с выраженными локальными пиками, потенциально соответствующими структурам с контрастной магнитной восприимчивостью. Дальнейшее сопоставление этих участков с результатами трансформант магнитного поля (см. рис. 4–8) подтвердило наличие скрытых аномальных источников, ассоциированных с интрузивными телами. Далее для дополнительной визуализации аномального магнитного поля был использован растровый режим отображения (Image Maps), реализованный в программной среде Geosoft. Он позволил более наглядно представить общую морфологию аномалий и их распределение по территории. На одном из этапов обработки данных использовалась визуализация аномального магнитного поля с применением эффекта затенённого рельефа (Shaded Relief), что позволило более чётко проследить морфологию крупных аномалий.

До проведения детального анализа аномальное магнитное поле участка Каргоба подвергнуто специальной трансформации – приведению к полюсу (см. рис. 4). Процедура редукции к полюсу представляет собой пересчёт измеренного магнитного поля

в аномалии, которые наблюдались бы в условиях геомагнитного полюса, т.е. при вертикальной ориентации вектора напряжённости магнитного поля Земли и вертикальной намагниченности горных пород. Теоретически после выполнения процедуры приведения к полюсу максимумы и минимумы аномалий от глубинных объектов должны расположиться над центрами возмущающих объектов, аналогично гравитационным, сами аномалии по форме приблизиться к однополярным, т.е. освободиться от сопряжённых им аномалий противоположного знака, осложняющих восприятие целостной картины.

Процедура приведения к полюсу, как и большинство других преобразований магнитного поля, выполнена с использованием современного комплекса программ Geosoft Oasis Montaj™, при вычислениях угол наклоения $Incl = 68,65^\circ$, угол склонения $Decl = 5,21^\circ$.

Морфология аномального магнитного поля указывает на то, что его источники расположены на разных структурных этажах, поэтому одной из основных задач, требующих решения при интерпретации, является разделение полей от разных источников по глубине.

Высокочастотная компонента находит наиболее контрастное проявление в значениях вертикального градиента (VDR) магнитного поля (см. рис. 5). Трансформанта «вертикальный градиент» усиливает высокочастотную компоненту спектра магнитного поля, подчёркивает элементы, обусловленные локальными относительно неглубоко залегающими объектами, подавляет низкочастотную составляющую. Вертикальный градиент более контрастно, чем исходное поле, локализует верхние кромки магнитоактивных объектов.

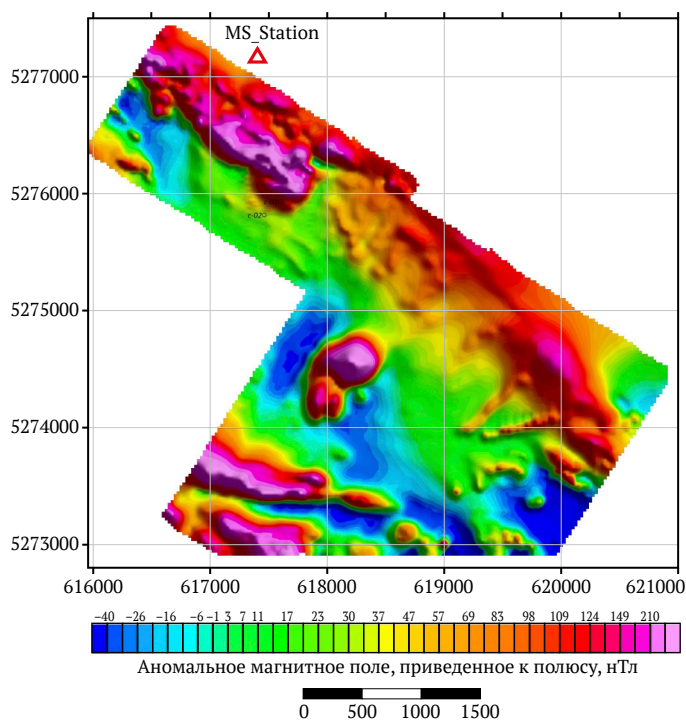


Рис. 4. Аномальное магнитное поле, приведенное к полюсу

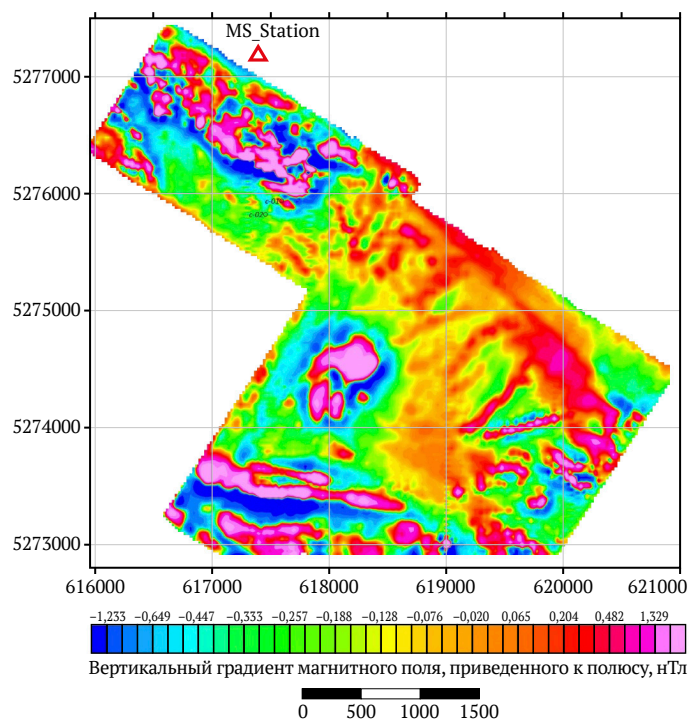


Рис. 5. Вертикальный градиент магнитного поля, приведенного к полюсу

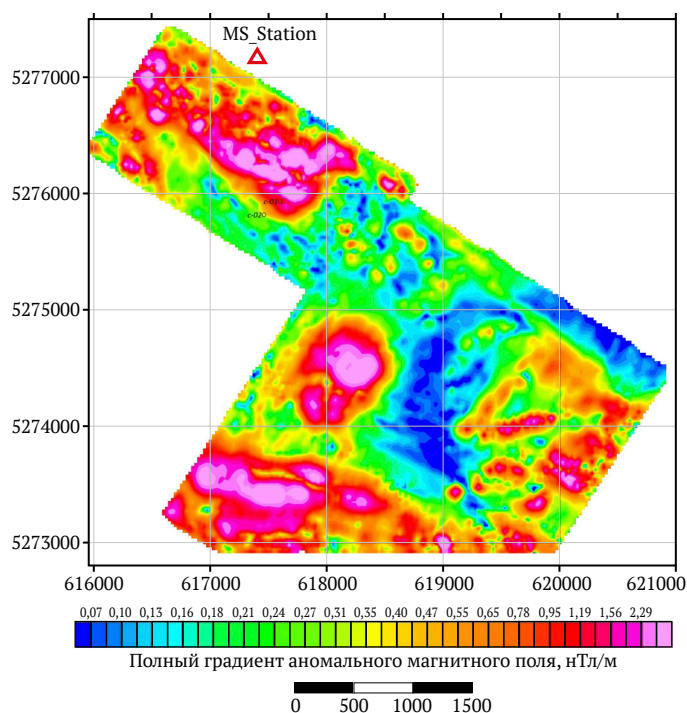


Рис. 6. Полный градиент (аналитический сигнал) аномального магнитного поля

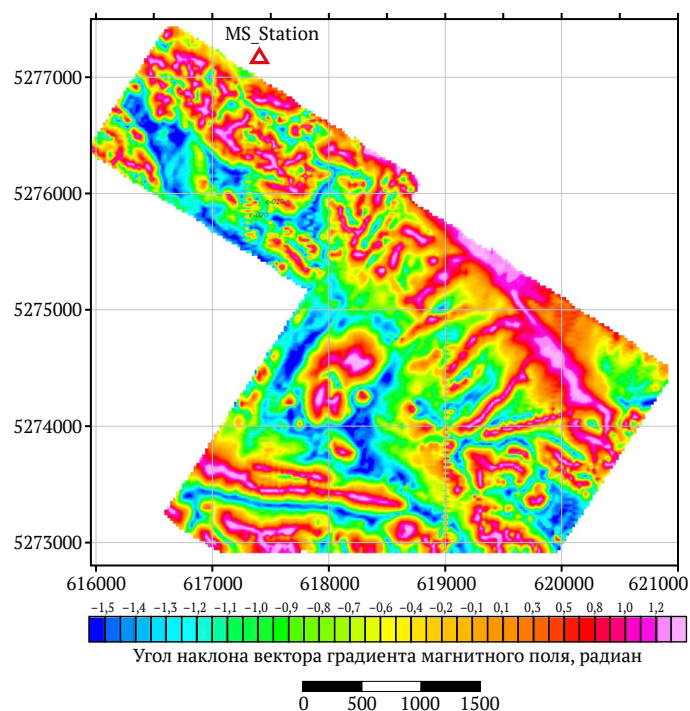


Рис. 7. Угол наклона вектора градиента магнитного поля к горизонту

Более точная локализация границ геомагнитных объектов может быть получена в результате анализа распределения модуля горизонтального градиента – $THDR$. Градиентные характеристики поля свободны от линейного фона – влияния крупных региональных аномалий и «нормального» градиента. В поле модуля горизонтального градиента экстремумами отмечаются границы аномалий различных амплитуд, что позволяет при визуализации увидеть одновременно контуры аномалий различной интенсивности. Линейные зоны максимальных значений модуля горизонтального градиента оконтуривают аномальные области, трассируют «ступени» и линии перегибов исходного магнитного поля, сопоставляемые с протяжёнными геологическими границами и разломами, подчёркивают границы тектонических блоков⁵.

Для сопоставления с вертикальными компонентами аномалий был также построен модуль горизонтального градиента магнитного поля. Данный метод позволил уточнить боковые границы источников, однако по сравнению с вертикальным градиентом (см. рис. 5) и аналитическим сигналом (см. рис. 6) информативность оказалась ниже.

На рис. 6 приведена карта модуля полного градиента (аналитического сигнала) магнитного поля.

Значение полного градиента, или аналитического сигнала (AS), аномального магнитного поля определяется как:

$$AS = \sqrt{VDR^2 + THDR^2},$$

где VDR – вертикальный градиент; $THDR$ – модуль горизонтального градиента магнитного поля.

Полный градиент магнитного поля полезен при выделении границ магнитных источников, не зависит от угла падения аномалиеобразующих геологических объектов и широты участка исследований. Аналогично горизонтальному градиенту аналитический сигнал позволяет проследить контакты магнитных образований, уточнить местоположение источника, локализовать положение верхних кромок магнитных объектов.

В качестве альтернативы варианта по отношению к вертикальному градиенту (VDR) для выделения тонкой структуры поля широко применяется трансформанта «угол наклона градиента» – Tilt derivative (TDR):

$$TDR = \tan^{-1}[VDR / THDR].$$

Угол наклона градиента измеряется в радианах, экстремальными значениями TDR практически с одинаковой амплитудой ($\pm 1,5$) уверенно отображаются все максимумы и минимумы исходного поля независимо от их интенсивности. TDR позволяет достаточно надёжно выполнять картирование планового положения объектов, их граней, способствует трассированию структурных элементов изучаемых участков. Экстремумы TDR соответствуют осевым линиям объектов, нулевые значения – границам. TDR существенно меньше, чем вертикальный градиент, модуль горизонтального градиента и аналитический сигнал, зависит от амплитуды аномалий исходного поля и позволяет более чётко трассировать оси слабых аномалий, связанных с более глубокими объектами. TDR

⁵ Шадринцев М.П. и др. Отчет о результатах маршрутных геолого-геофизических работ, выполненных на участке Тарбагатайском в 1974–75 гг. (листы L-44-9-Г; L-21-Б-6, г; L-44-22-А-а, в). Алтайская КГЭ, пос. Опытное поле, май 1976 г.

отождествляется с полем остаточных аномалий, позволяет подчеркнуть тонкую структуру поля.

Карта угла наклона градиента магнитного поля участка Каргоба представлена на рис. 7. Модуль горизонтального градиента угла наклона *TDR-THDR* подчёркивает (трассирует) грани аномальных объектов. Эта трансформанта не подвержена эффекту звона (генерирование ложных максимумов) и соответственно не даёт ложных граней. По интенсивности максимумов *TDR-THDR* может быть дана оценка глубины граней (объектов). Осевые линии зон максимальных значений *TDR-THDR* трассируют границы объектов, отличающихся по магнитным свойствам.

Для исследования характера распределения магнитных свойств участка Каргоба в 3D-пространстве выполнено объёмное моделирование посредством алгоритма интерпретационной томографии. Модель эквивалентного распределения магнитных источников вычислена на основе специальных приёмов фильтрации исходного поля, реализованных в комплексе программ *IP Seismic*, модуль моделирования и инверсии гравимагнитных данных. Технология относится к разряду интерпретационной томографии и не требует каких-либо априорных знаний об изучаемом объекте⁶.

Объёмная геомагнитная модель участка Каргоба вычислена в интервале глубин 0–1000 м, размер элементарной 3D-ячейки $dX, dY, dZ = 25 \text{ м}, 25 \text{ м}, 10 \text{ м}$. Созданная объёмная модель в формате Segy экспортирована в таблицу текстового формата ASCII и загружена в БД *Geosoft Oasis Montaj™*. Глубины пересчитаны в абсолютные отметки. Вычисление 3D-сети (алгоритм 3D Gridding/Kriging) и визуализация выполнены средствами *Geosoft 3D*. Размер элементарной ячейки 3D-модели (Voxler) избыточной намагниченности участка Каргоба равен $25 \times 25 \times 10 \text{ м}$.

Элементы объёмной модели намагниченности участка магнитной съёмки рудопроявления Каргоба показаны на рис. 8, 9.

Значения намагниченности в условных единицах: повышенным значениям соответствуют желто-красно-розовые цвета, пониженным – зелено-голубые до интенсивного синего.

В качестве геологической основы при интерпретации аномалий магнитного поля принята схематическая геологическая карта участка Каргоба масштаба 1 : 25 000⁷.

Схематическая геологическая карта участка рудопроявления Каргоба представлена на рис. 10.

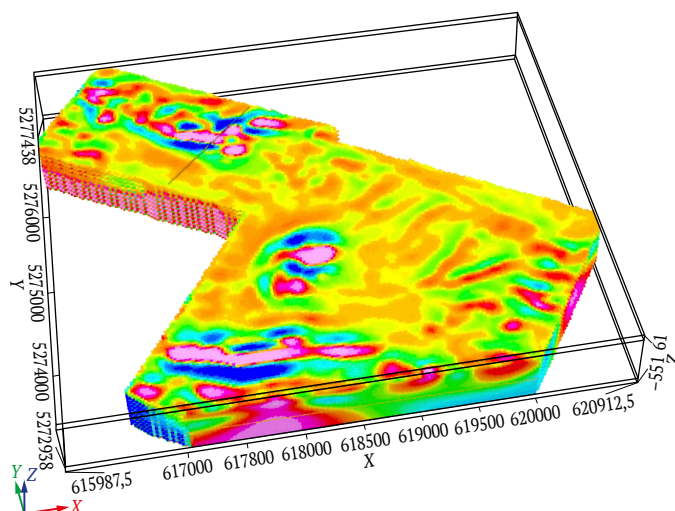


Рис. 8. Общий вид 3D-модели намагниченности, диапазон глубин 0–500 м

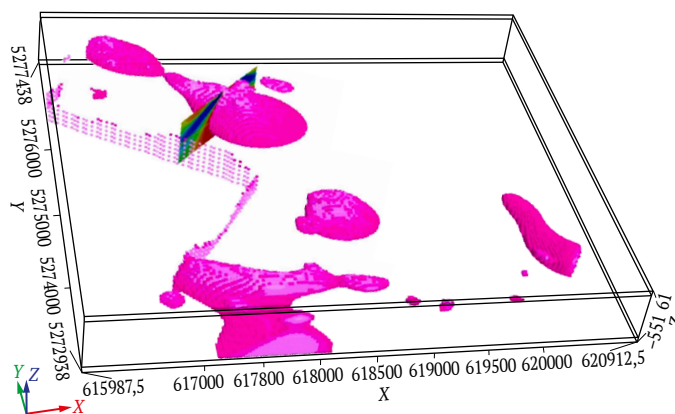


Рис. 9. Зоны повышенной намагниченности, $F > 11,4$ усл. ед.

Результаты и обсуждение

В отличие от традиционной наземной магнитометрии использование БПЛА позволяет получать более плотную и равномерную сеть наблюдений, особенно в труднодоступных и слабо освоенных районах. Это принципиально повышает детальность картирования и достоверность пространственного анализа аномальных источников. Например, при классической съёмке с шагом 50–100 м обнаружение локальных тел малой мощности, залегающих на глубинах до 150 м, затруднено из-за пространственного сглаживания сигнала и влияния рельефа [16, 17].

Применение высокочастотных преобразований, таких как *TDR* (Tilt Derivative Ratio) и аналитический сигнал, в комплексе с данными БПЛА-съёмки позволяет достичь разрешающей способности 25–30 м, что сопоставимо с параметрами бурового разведочного шага на этапе оценочных работ. Кроме того, в отличие от классических инверсий на основе метода продолжения вверх в предлагаемом подходе используется обратная задача с регуляризацией, адаптированная под особенности ближнего поля, характерного для маловысотных измерений (высота полёта 35–50 м).

⁶ Шадринцев М.П. и др. Отчет о результатах маршрутных геолого-геофизических работ, выполненных на участке Тарбагатайском в 1974–75 гг. (листы L-44-9-Г; L-21-Б-6, г; L-44-22-А-а, в). Алтайская КГТЭ, пос. Опытное поле, май 1976 г.

⁷ Отчет о геологическом доизучении с оценкой прогнозных ресурсов листов L-44-V, XI, XVII (казахстанская часть). ТОО «Капчагайская геолого-производственная экспедиция», г. Алматы 2016 г. Отв. исп. А. В. Дубинкин, А. К. Ахматолла, В. В. Подковыров и др.

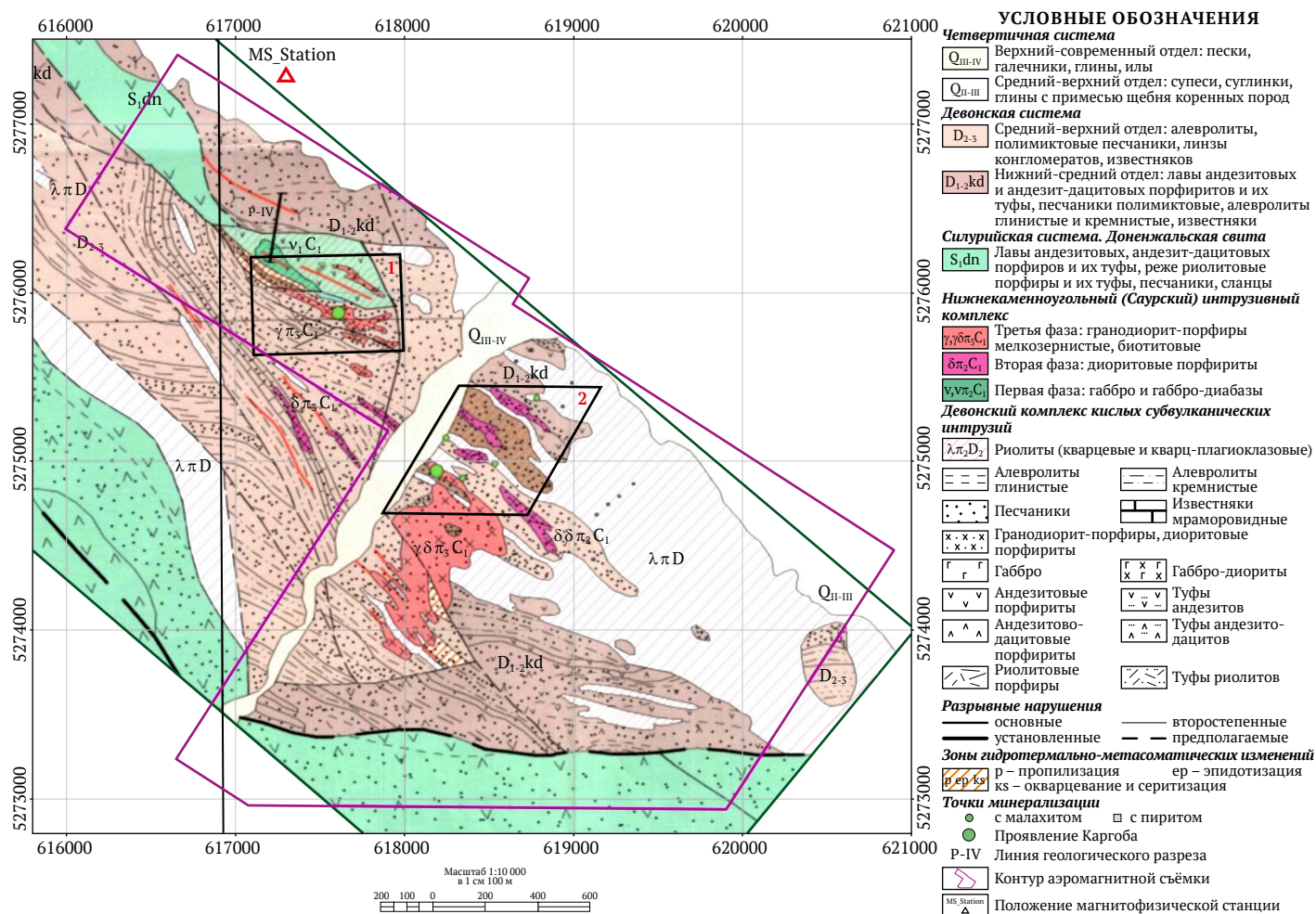


Рис. 10. Схематическая геологическая карта участка рудопроявления Каргоба

Источник: Алимханов Н. К., Башкирцев А. М. и др. Отчет по объекту «Поисковые работы в пределах Восточного региона на перспективных площадях» за 2005–2007 гг. ТОО «ГРК «Топаз», г. Усть-Каменогорск, декабрь 2007 г.

Важно отметить, что в известных работах по применению БПЛА в порфировых системах (например, в условиях Перу и Центральной Азии [18]) основное внимание уделялось либо общей картографической точности, либо обнаружению крупных структур. Настоящее исследование, в отличие от них, демонстрирует возможность выявления скрытых локализованных тел с промышленным потенциалом за счёт комплексного анализа трансформант, 3D-моделирования и геологического сопоставления. Это указывает на вклад авторов в развитие методики локальной глубинной интерпретации аэромагнитных данных при помощи БПЛА.

Эффективность предложенного подхода подтверждается при его применении к рудопроявлению Каргоба – одному из малоизученных объектов Восточного Казахстана с признаками порфирового оруденения. В целях проверки методики в реальных геолого-структурных условиях были проведены анализ ранее известных данных и интерпретация новых аэромагнитных материалов.

Рудопроявление Каргоба открыто в 1957 г. Чингизской аэрогеофизической партией № 31 Волковской экспедиции были выделены два участка медной ми-

нерализации (пирит, халькопирит, малахит, азурит) в осветлённых песчаниках, гранодиорит-порфирах, кварцевых порфирах, на которых пройдены каналы и пробурены 4 скважины глубиной до 100 м. В скважинах подсечена рудная минерализация с содержанием меди от 0,1 до 0,5 % в нескольких интервалах на глубине от 12 до 92 м⁸.

В 1974–1975 гг. Тарбагатайской партией АГТЭ⁹ с целью детального изучения и оценки рудопроявления выполнен комплекс поисковых работ, включавший электроразведку методом ВП-СГ по сети 250×25 м, металлотрическую съёмку по сети 250×25 м, проходку канав и шурфов, бурение картировочных скважин (890 м) и бурение двух поисковых скважин глубиной до 300 м. В результате были установлены прожилково-вкрапленный медно-молибденовый тип оруденения и его генетическая связь с гранодиорито-

⁸ Шадринцев М.П. и др. Отчет о результатах маршрутных геолого-геофизических работ, выполненных на участке Тарбагатайском в 1974–75 гг. (листы L-44-9-Г; L-21-Б-6, г; L-44-22-А-а, в). Алтайская КГТЭ, пос. Опытное поле, май 1976 г.

⁹ Там же.



вой интрузией. Оруденение локализуется в полосе гидротермально-метасоматически изменённых пород, прослеживающейся в северо-западном направлении на 2,5 км при ширине 0,5 км на обоих берегах реки Каргоба, и пространственно приурочено к апикальной части гранодиоритовой интрузии. На левом берегу горными выработками с поверхности были выделены рудные тела с содержанием меди выше 0,1 %, а на глубине до 150 м поисковыми скважинами подсечены рудные интервалы с содержаниями меди от 0,3 до 5 %. По выделенным рудным телам до глубины 300 м подсчитаны авторские прогнозные ресурсы в количестве 800 тыс. т меди и 100 тыс. т молибдена. Правобережная часть проявления осталась неизученной.

С целью дальнейшего изучения проявления Каргоба – уточнения геологического строения, изучения особенностей локализации оруденения, прослеживания рудных зон в северо-западном и юго-восточном направлениях, опоискования и оценки его правобережной части – в 2005–2007 гг.¹⁰ на площади 25,5 км² выполнены поисковые геологические маршруты, магниторазведка по сети 1000–500×50 м, проходка канав – 467 м³, поиски по первичным ореолам рассеяния элементов (опробование коренных пород в поисковых маршрутах и по геолого-геохимическим профилям) – 773 пр.

По совокупности геологических, геохимических, геофизических признаков на левобережной и правобережной частях проявления возможно выявление рудных концентраций в промышленных масштабах. На левобережной части проявления выделено с поверхности и на глубинах до 160 м как минимум четыре рудных тела с высокими содержаниями меди и молибдена. Отмечено, что уровнем эрозионного среза затронуты самые верхи оруденения, поэтому можно ожидать увеличения средних содержаний рудных элементов и мощности рудных тел с глубиной. Не исключено, что рудные тела на глубине соединятся в единое тело.

На правобережье реки Каргоба поисковыми работами установлено, что мощная зона кремне-кислотного метасоматоза с кварц-серицитовыми пиритсодержащими метасоматитами прослеживается от реки в юго-восточном направлении на 1 км. Её ширина составляет 0,5–0,7 км. В её пределах высокие концентрации рудных элементов установлены на участке выходов гранодиорит-порфиоров.

Вероятность выявления рудного объекта медно-порфирового типа на площади почти 1 км² правобережной части участка работ, аналогичного по масштабу и запасам объекту левобережной части, достаточно высока.

В результате проведённых поисковых работ на медно-молибденовом проявлении Каргоба выделен весьма перспективный рудный объект медно-порфирового типа, который рекомендован на проведение поисково-оценочных и разведочных работ.

Исходя из вышеприведённых данных основным источником медно-молибденового оруденения являются тела гранодиоритов, с которыми связано образование мощных зон гидротермально-метасоматических изменений пород с рудной минерализацией. В то же время была выявлена полоса эпидотизированных и окремнённых лав андезитов и андезито-дацитов у контакта с интрузией гранитов. Она прослежена в субмеридиональном направлении на 750–800 м при ширине 10–80 м. В её пределах визуально отмечается медная минерализация (малахит) по трещинкам в породах.

Кроме того, отмечаются высокие содержания молибдена и, вероятно, в определённых промышленных количествах должны присутствовать серебро и золото.

Аномальное магнитное поле участка исследований, несмотря на относительно небольшие его размеры, весьма дифференцировано. Минимальные значения магнитного поля пространственно совпадают с областью распространения алевролитов, полимиктовых песчаников среднего-верхнего девона, занимающих центральную часть площади магнитной съёмки и протягивающихся полосой в северо-западном направлении.

Относительно малоградиентным магнитным полем повышенного уровня отмечаются риолит-порфиры (кварцевые и кварц-плагиоклазовые) девонского комплекса кислых субвулканических интрузий, имеющих наибольшее распространение в северо-восточной части площади исследований.

Области положительных значений магнитного поля мозаичной структуры характерны для участков распространения лав и туфов андезитовых и андезито-дацитовых порфириров доненжальской свиты силура. Наиболее интенсивными локальными положительными аномалиями магнитного поля выделяются гранодиоритовые порфириды третьей фазы саурского интрузивного комплекса нижнекаменноугольного возраста.

Зоны положительных магнитных аномалий, выделенные на площади рудопроявления Каргоба, пронумерованы и показаны на схеме интерпретации (рис. 11).

По результатам магнитной съёмки на участке Каргоба выделено 6 зон положительных магнитных аномалий:

А-1 – зона положительных магнитных аномалий располагается в северо-западной части площади съёмки, имеет линейные размеры 2×0,5 км и вытянута в северо-западном направлении. Местоположение и направление простирания хорошо согласуются с геологическими границами, показанными на схематической геологической карте участка рудопроявления Каргоба. Аномальная область имеет достаточно сложное бугристо-мозаичное строение, интенсивность отдельных магнитных максимумов достигает 400, 500, 800 нТл. Природа аномалии, вероятно, смешанная – лавы андезитовых, андезито-дацитовых порфириров; гранодиориты, диориты саурского интрузивного комплекса.

¹⁰ Алимханов Н.К., Башкирцев А.М. и др. Отчет по объекту «Поисковые работы в пределах Восточного региона на перспективных площадях» за 2005–2007 гг. ТОО «ГРК «Топаз», г. Усть-Каменогорск, декабрь 2007 г.

А-2 – аномальная область располагается на левом берегу р. Каргоба, местоположение в целом соответствует выходам штока гранодиорит-порфиров саурского интрузивного комплекса, показанным на геологической карте. Аномальная область включает в себя 4 локализованных максимума. Северный максимум в плане имеет изометричную форму, размер в диаметре 400–500 м, интенсивность 480 нТл. К западу и югу выделяются локальные магнитные максимумы, несколько вытянутые в субмеридиональном направлении, линейные размеры 100–150×150–250 м, интенсивность 180–200 нТл.

А-3 расположена в южной части площади. Представляет собой цепочку локальных магнитных максимумов, образующих единую линейную зону (2000×200–250 м), вытянутую в субширотном направлении. Локальные максимумы имеют амплитуды от 180 до 400 нТл. А-3 пространственно тяготеет к зоне контакта андезитовых порфиров доненжальской свиты силура с толщей алевролитов, полимиктовых песчаников среднего-верхнего девона. Геологическая природа магнитных аномалий может быть связана с гранодиоритами саурского интрузивного комплекса, внедрившимися по линии тектонических нарушений субширотного направления.

В 400 м южнее А-3 практически на границе участка магнитной съёмки в области развития андезитовых, андезито-дацитовых порфиров силура выделена аномальная зона положительных магнитных

аномалий А-4. В пределах аномальной зоны общим размером 1200×250 м локализуются отдельные максимумы интенсивностью до 250 нТл.

А-5 представляет собой линейно вытянутую в северо-западном направлении зону (4500×500–1200 м) повышенных значений магнитного поля до 150–180 нТл, располагается в северной части участка магнитной съёмки. На геологической карте аномальной зоне повышенных значений магнитного поля соответствуют выходы риолит-порфиров девонского комплекса кислых субвулканических интрузий.

А-6 представляет собой фрагмент положительной магнитной аномалии небольшой интенсивности (110–120 нТл), расположенной в юго-западном углу участка магнитной съёмки. На геологической карте здесь показаны полимиктовые песчаники среднего-верхнего девона. Возможно, магнитная аномалия связана с небольшими субвулканическими телами риолит-порфиров девона.

Наиболее интересной в поисковом плане как перспективный участок на медно-порфировое оруденение представляется аномальная область А-2. Характер проявления в магнитном поле гранодиорит-порфирового штока по геометрическим параметрам и интенсивности во многом аналогичен магнитным аномалиям, установленным над золоторудными месторождениями Юбилейное и Райгородок (рис. 12). При проведении поисковых работ необходимо дать оценку перспектив не только на медь, но и на золото.

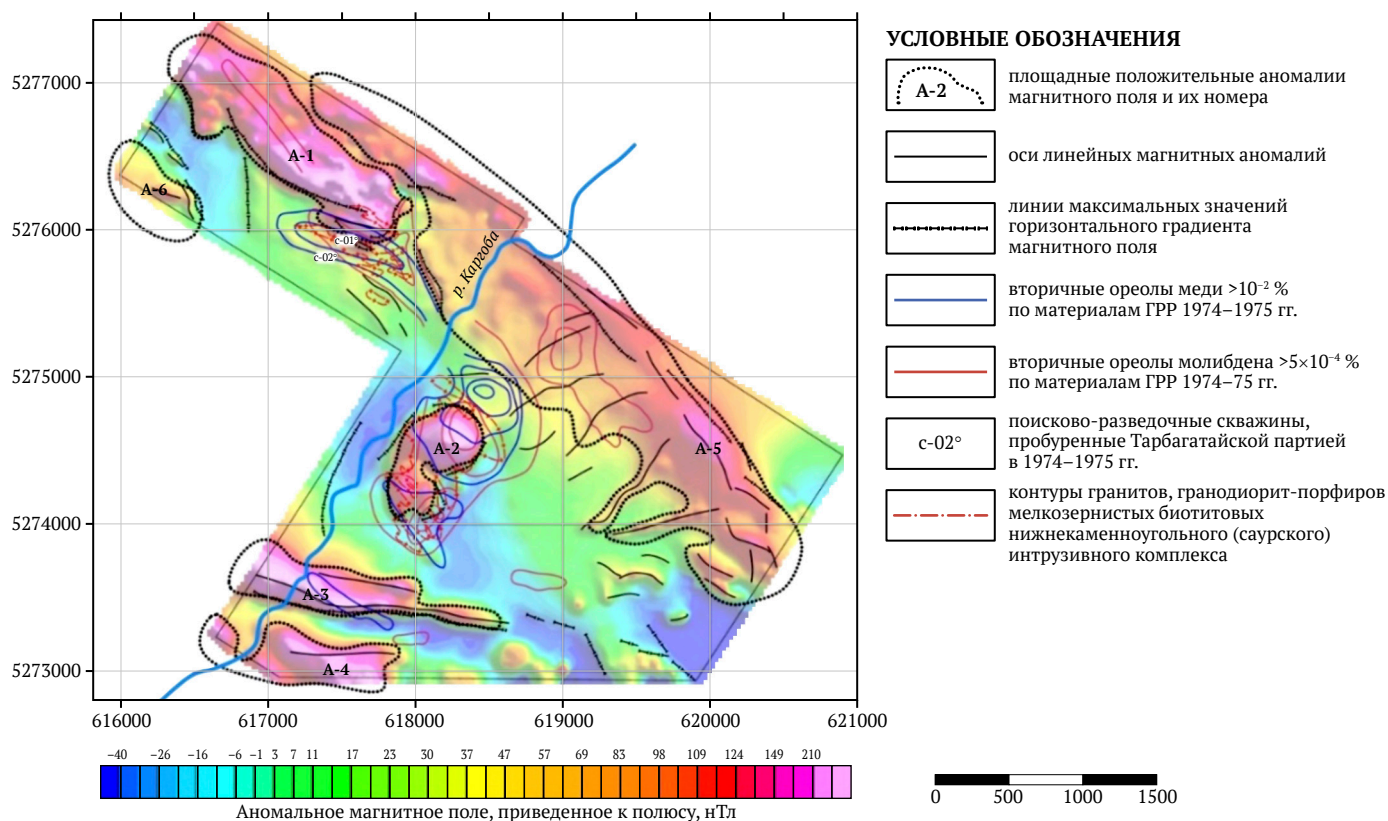


Рис. 11. Схема интерпретации магнитного поля с элементами прогноза и основными линеаментами

Источник: Дубинкин А. В., Ахматолла А. К., Ниязов А. В. и др. Геологическое доизучение с оценкой прогнозных ресурсов листов L-44-V, XI, XVII (казахстанская часть): Фондовый отчёт. Алматы: ТОО «Капчагайская геолого-производственная экспедиция», 2016

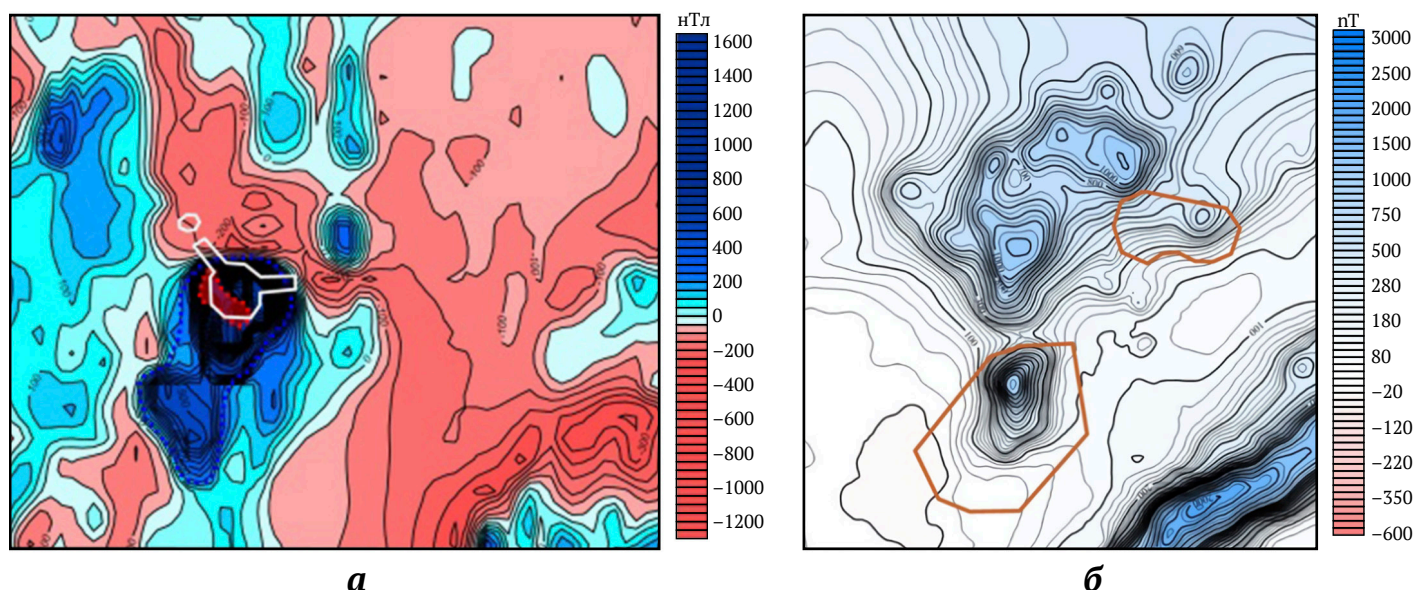


Рис. 12. Аномальное магнитное поле на участках месторождений золота Юбилейное (а) и Райгородок (б)

Месторождение Юбилейное находится в Актюбинской области Республики Казахстан, в западном крыле Кундуздинской синклинали. Месторождение приурочено к штоку биотит-роговообманковых плагиогранит-порфиров, прорывающих базальты и андезито-базальты мугоджарской свиты, окаймлённой интенсивно окварцованными породами.

Золотое оруденение залегает в гидротермально-изменённых породах и размещается как по периферийной зоне интрузии, так и в пределах самой интрузии. Рудные тела представляют собой штокверковые зоны, образованные густой системой прожилков мощностью 0,1–10 см. На отдельных участках сеть прожилков сгущается с образованием сплошных кварцевых метасоматитов. Руды месторождения относятся к умеренно сульфидному типу. Главными минералами первичных руд являются: халькопирит, пирит, магнетит, золото самородное, антимонит. Второстепенными минералами – сфалерит, галенит, пирротин, марказит, рутил. Нерудные минералы: кварц, кальцит, доломит, эпидот, альбит, хлорит, актинолит, серицит.

Во вмещающих кварцево-сульфидных рудах кроме золота, меди и серебра содержатся мышьяк и сурьма – 0,001–0,1 % и цинк – 0,01–0,2 %. Спорадически обнаруживаются молибден, свинец, скандий, галлий, иттрий, иттербий, висмут, вольфрам в пределах до тысячных долей процента.

В магнитном поле площадь месторождения совпадает с интенсивной положительной магнитной аномалией практически изометричной формы. Высокая интенсивность аномалии может быть объяснена значительной магнитной восприимчивостью интрузивных пород гранодиорит-диоритового состава, а также ороговикованием вмещающих пород в её кровле.

Рудное поле месторождения Райгородок пространственно тяготеет к локальным магнитным аномалиям интенсивностью 800–1000 нТл. Рудное поле

месторождения Райгородок Северный приурочено к зоне контакта габбро-диорит-монцититового массива с конгломератовой толщей верхнего ордовика в апикальном выступе массива. Вмещающие породы интенсивно гранитизированы и скарнированы.

Протяжённость рудных тел изменяется от десятков до 400 м, а мощности их – от нескольких метров до первых десятков метров. Друг от друга рудные тела отделяются пачками безрудных пород и некондиционных прослоев, имеющих мощности, сопоставимые с мощностями рудных тел. Распределение золота в рудах неравномерное. Содержание золота невысокое, обычно порядка 0,5–2,5 г/т. Содержание серебра в рудах сопоставимо с золотом.

Месторождение Южный Райгородок приурочено к эндо- и экзоконтактам небольшого интрузивного тела диорит-габбро-диоритового состава, прорывающего толщу грубообломочных до глыбовых конгломератов верхнеордовикского возраста. Рудные тела представлены зонами прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации (пирит, халькопирит, галенит, молибденит) с золотом, имеющих сложную форму, особенно в сочленениях зон дробления различной ориентировки. Мощность рудных зон колеблется от 1–2 до 35–40 м. Содержание золота – от следов до 150 г/т.

Рудопроявление Центральный Райгородок приурочено к надкупольной части небольшого штокообразного тела диоритового состава. Рудные тела представлены зонами прожилкового окварцевания мощностью от 0,5 до 1 м и приурочены в основном к контактам даек диоритов и диоритовых порфиров с вмещающими их конгломератами. Содержание золота в них – от 0,3 до 10 г/т.

Опираясь на принцип аналогии, считаем возможным рекомендовать проведение поисковых работ в районе магнитной аномалии А-2 участка Каргоба как на медные руды, так и на золото. Наи-



большой интерес представляют участки гидротермально-изменённых пород как по периферийной зоне в экзоконтакте интрузии, так и в пределах самой интрузии. При выполнении поисковых работ считаем полезным в комплекс геофизических исследований включить гамма-спектрометрию для выявления и картирования участков вторичных изменений (метасоматоза) пород и высокоточную детальную гравиразведку для изучения объёмной геоплотностной модели интрузии.

Такой подход к выделению перспективных участков на основе сопоставления с эталонными объектами подтверждается результатами анализа цифровых моделей рельефа на Актогайском рудном поле [19]. В указанном исследовании показано, что крупные медно-порфировые месторождения (Актогай, Айдарлы) выражены в рельефе в виде локальных кальдерообразных понижений, а участки с аналогичными морфометрическими характеристиками рассматриваются как перспективные для дальнейших поисков. Это согласуется с выделенной нами зоной А-2, которая также характеризуется сочетанием положительных магнитных аномалий, гидротермальных изменений и структурнообусловленных форм рельефа.

Заключение

В результате выполненных аэромагнитных работ создана детальная магнитометрическая основа масштаба 1: 5 000 для обеспечения поисковых работ на участке рудопроявления Каргоба.

Аэромагнитная съёмка выполнена по современной технологии маловысотных съёмок с применением БПЛА DJI Matrice 300 RTK и рубидиевого квантового магнитометра. Технология сочетает в себе высокую маневренность беспилотного летательного аппарата с высокой чувствительностью магнитометрического оборудования. Система позволяет выполнять высокоточные аэромагнитные съёмки на предельно малой высоте с детальным огибанием ре-

льефа как в равнинной местности, так и в сложных ландшафтных условиях. В результате применения новой технологии удалось в разы повысить производительность съёмки относительно наземных работ, существенно улучшить детальность и разрешение магнитных измерений относительно аэромагнито-разведки с пилотируемыми носителями.

Анализ и обработка магнитного поля проведены с применением современных технологий и программных комплексов. Вычисленные трансформанты магнитного поля позволяют выделить компоненты, отражающие разноранговые и разноточностные элементы геомагнитной модели.

В ходе проведённого исследования была достигнута поставленная цель – обоснована эффективность применения высокоточной аэромагнитной съёмки с использованием беспилотных летательных аппаратов для локализации скрытых зон порфирового оруденения. В результате получены новые качественные и количественные данные, включая пространственную модель намагниченности до глубины 500 м, на основе которой выделено шесть аномальных зон. Из них зона А-2 рекомендована как приоритетная для дальнейших исследований. Установлены параметры рудных тел: глубина залегания – от 50 до 150 м, протяжённость – 2 км. Подтверждена пространственная связь аномалий с гранодиоритовой интрузией. Выделенные геофизические критерии – амплитуда аномалий 200–500 нТл, протяжённость 0,5–2 км, наличие сопряжённых аномалий и корреляция с гранодиоритами – подтверждают перспективность участка для порфирового медно-молибденового оруденения.

Полученные результаты демонстрируют применимость предложенной методики в аналогичных геологических условиях и формируют надёжную основу для последующего бурового тестирования с высокой вероятностью выявления промышленного рудного объекта.

Список литературы / References

1. Gonzalez-Alvarez I., Goncalves M.A., Carranza E.J.M. Introduction to the special issue challenges for mineral exploration in the 21st century: Targeting mineral deposits under cover. *Ore Geology Reviews*. 2020;126:103785. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103785>
2. Pei Y., Liu B., Hua Q. et al. An aeromagnetic survey system based on an unmanned autonomous helicopter: Development, experiment, and analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 2017;38(8):3068–3083. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1274448>
3. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets. *Geophysical Prospecting*. 2019;68(1):334–349. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>
4. Zheng Y., Li S., Xing K., Zhang X. Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: a review on platform selection and interference suppression. *Drones*. 2021;5(3):93. <https://doi.org/10.3390/drones5030093>
5. Malehmir A., Dynesius L., Paulsson K. et al. The potential of rotary-wing uav-based magnetic surveys for mineral exploration: a case study from Central Sweden. *The Leading Edge*. 2017;36(7):552–557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>
6. Lv W., Huang P., Yang Y. et al. A novel method of magnetic sources edge detection based on gradient tensor. *Minerals*. 2024;14(7):657. <https://doi.org/10.3390/min14070657>
7. Abdelrady M., Pham L.T., Mohamed A. et al. Application of the new edge filters of aeromagnetic data to detect the subsurface structural elements controlling the mineralization in the Barramiya area, Eastern



- Desert of Egypt. *Journal of King Saud University – Science*. 2024;36(11):103539. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103539>
8. Богдасаров М.А., Маевская А.Н., Петров Д.О., Шешко Н.Н. ГИС-моделирование строения кайнозойской толщи Брестской области для прогноза и оценки залежей нерудного сырья. *Горные науки и технологии*. 2024;9(4):328–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-230>
Bogdasarov M.A., Mayevskaya A.N., Petrov D.O., Sheshko N.N. GIS modeling of a Cenozoic strata structure in Brest region for forecasting and evaluation of non-metallic deposits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):328–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-230>
 9. Коршунов Д.М., Хвостиков А.В., Николаев Г.В. и др. От визуальной диагностики к глубокому обучению: автоматическое определение минералов на фотографиях аншлифов. *Горные науки и технологии*. 2025;10(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-416>
Korshunov D.M., Khvostikov A.V., Nikolaev G.V. et al. From visual diagnostics to deep learning: automatic mineral identification in polished section images. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-416>
 10. Vallée M.A., Moussaoui M., Khan K. Case studies of magnetic and electromagnetic techniques covering the last fifteen years. *Minerals*. 2024;14(12):1286. <https://doi.org/10.3390/min14121286>
 11. Lu N., Xi Y., Zheng H. et al. Development of a hybrid fixed wing uav aeromagnetic survey system and an application study in chating deposit. *Minerals*. 2023;13(8):1094. <https://doi.org/10.3390/min13081094>
 12. Pham L.T., Oliveira S.P. Edge enhancement of magnetic sources using the tilt angle and derivatives of directional analytic signals. *Pure and Applied Geophysics*. 2023;180:4175–4189. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03375-y>
 13. Pham L.T., Smith R.S., Oliveira S.P., Jorge V.T. Enhancing magnetic source edges using the tilt angle of the analytic-signal amplitudes of the horizontal gradient. *Geophysical Prospecting*. 2024;72(8):3026–3037. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13573>
 14. Abdelrahman K., Pham L.T., Oliveira S.P. et al. Reliable Tilt-depth estimates based on the stable computation of the tilt angle using robust vertical derivatives. *Scientific Reports*. 2024;14:7392. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57314-5>
 15. Geoscan. Geoshark MG30GM Quantum Magnetometer. Available online: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401/geophysics> (Accessed on 13 June 2026).
 16. Efrem R., Coutu A., Saeedi S. *Suspended magnetometer survey for mineral data acquisition with vertical take-off and landing fixed-wing aircraft*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.11797>
 17. Efrem R., Coutu A., Saeedi S. *Sensor Integration and Performance Optimizations for Mineral Exploration Using Large-scale Hybrid Multirotor UAVs*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.11810>
 18. Lu N., Xi Y., Zheng H. et al. Development of a hybrid fixed-wing UAV aeromagnetic survey system and an application study in chating deposit. *Minerals*. 2023;13(8):1094. <https://doi.org/10.3390/min13081094>
 19. Сайб Н., Белов Ю., Зимановская Н. и др. Анализ цифровой модели рельефа для решения геологических задач на примере Актогайского рудного поля. *Горные науки и технологии*. 2025;10(3):245–261. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-422>
Seib N., Belov Yu., Zimanovskaya N. et al. Analysis of a digital terrain model for solving geological problems by the example of Aktogai ore field. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(3):245–261. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-422>

Информация об авторах

Гулизат Багдатовна Оразбекова – PhD (геология и разведка полезных ископаемых), преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-4503-6838, Scopus ID 57215986570; e-mail g.ozzbekova@shakarim.kz

Индира Едылевна Матайбаева – PhD, ассоциированный профессор Школы наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0000-0003-0550-7591, Scopus ID 57195672336; e-mail indiramataibayeva@gmail.com

Наталья Александровна Зимановская – PhD, ассоциированный профессор Школы наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-9881-690X, Scopus ID 56369110800; e-mail nzimanovskaya@edu.ektu.kz

Алтынай Айбековна Рагданова – преподаватель Школы наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-9138-2213; e-mail Altynai.2492@gmail.com

Асель Сериковна Сарсембаева – PhD, кандидат технических наук, профессор, Университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан; ORCID 0000-0001-7516-6775, Scopus ID 56910207600; e-mail a.sarsembayeva@shakarim.kz



Information about the authors

Gulizat B. Orazbekova – PhD (Geology and Mineral Exploration), Lecturer, Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0002-4503-6838](#), Scopus ID [57215986570](#); e-mail g.orazbekova@shakarim.kz

Indira E. Mataibayeva – PhD, Associate Professor, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0003-0550-7591](#), Scopus ID [57195672336](#); e-mail indiramataibayeva@gmail.com

Natalya A. Zimanovskaya – PhD, Associate Professor, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0002-9881-690X](#), Scopus ID [56369110800](#); e-mail nzimanovskaya@edu.ektu.kz

Altynay A. Ragdanova – Lecturer, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0002-9138-2213](#); e-mail Altynai.2492@gmail.com

Assel S. Sarsembayeva – PhD, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0001-7516-6775](#), Scopus ID [56910207600](#); e-mail a.sarsembayeva@shakarim.kz

Поступила в редакцию 27.06.2025
Поступила после рецензирования 11.09.2025
Принята к публикации 12.09.2025

Received 27.06.2025
Revised 11.09.2025
Accepted 12.09.2025