



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.8

EDN: KWATNN

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223

**Разработка методики и оптимального комплекса геофизических исследований при выделении перспективных областей на наличие рудного золота в пределах Каспинского рудного узла****И.В. Трофимов^a, Е.Д. Валькова^b, А.В. Лазурченко^c, А.П. Степанов^d, А.Ю. Давыденко^e**^{a-e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^eИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Резюме. В статье представлены результаты применения комплекса геофизических методов для изучения Каспинского рудного узла в Красноярском крае. Цель исследования заключалась в оценке эффективности различных современных методов при решении задачи выделения границ интрузивных массивов и анализе тектонических нарушений, которые играют ключевую роль в формировании золото-сульфидно-кварцевого оруденения. Геофизический комплекс включал в себя беспилотную магниторазведку (комплекс SibGIS UAS), бесконтактное измерение электрического поля (аппаратный комплекс БИКС) и электромагнитное зондирование с вызванной поляризацией (аппаратно-программный комплекс «Марс»). Магниторазведка позволила выделить малые диоритовые массивы Ольховского комплекса и их контакты с карбонатными отложениями, а также выявить тектонические нарушения. Электроразведочные работы способствовали анализу мелких разломов и распределения вызванной поляризации, что важно для поиска зон минерализации. Также в рамках исследования была выполнена трехмерная каскадная инверсия магниторазведочных данных для локализации интрузивных тел. В результате проведенной работы был сделан вывод о том, что представленная методика не является оптимальной, комплекс геофизических методов является избыточным. В дальнейших исследованиях предлагается исключить метод бесконтактного измерения электрических полей из-за малого количества полезной информации и проблем в интерпретации по сравнению с методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. Помимо этого, основным изменением в методике является последовательность этапов выполнения работ. Полученные в результате проведенного исследования данные послужили одной из основ для постановки буровых работ поискового этапа.

Ключевые слова: метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, беспилотная магниторазведка, Красноярский край, Каспинский рудный узел, трехмерная каскадная инверсия

Для цитирования: Трофимов И.В., Валькова Е.Д., Лазурченко А.В., Степанов А.П., Давыденко А.Ю. Разработка методики и оптимального комплекса геофизических исследований при выделении перспективных областей на наличие рудного золота в пределах Каспинского рудного узла // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 204–223. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223>. EDN: KWATNN.

GEOPHYSICS

Original article

Development of a methodology and an optimal complex of geophysical studies when identifying ore gold promising areas within Kaspinsky ore cluster**Ilya V. Trofimov^a, Evgeniya D. Valkova^b, Anton V. Lazurchenko^c,
Aleksandr P. Stepanov^d, Aleksandr Yu. Davydenko^e**^{a-e}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^eIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article presents the application results of a set of geophysical methods to study the Kaspinsky ore cluster in the Krasnoyarsk Krai. The purpose of the study was to evaluate the efficiency of various modern methods when solving the problem of identifying the boundaries of intrusive massifs and analyzing tectonic disturbances that play a key role in the formation of gold-sulfide-quartz mineralization. The geophysical complex included unmanned magnetic exploration

© Трофимов И.В., Валькова Е.Д., Лазурченко А.В., Степанов А.П., Давыденко А.Ю., 2025



(SibGIS UAS complex), non-contact electric field measurement (BIKS non-contact measurement of electric field hardware complex) and electromagnetic sensing with induced polarization (Mars hardware and software complex). Magnetic exploration allowed to identify small diorite massifs of the Olkhovskiy complex and their contacts with carbonate deposits, as well as to identify tectonic faults. Electrical exploration contributed to the analysis of small faults and distribution of induced polarization, which is important when searching for mineralization zones. Also, the study included a three-dimensional cascade inversion of magnetic exploration data for intrusive body localization. Conducted work resulted in the conclusion that the presented methodology is not optimal and the complex of geophysical methods is redundant. It is proposed to exclude the method of non-contact measurement of electric fields in further researches due to the small amount of useful information and interpretation problems as compared with the method of electromagnetic sensing and induced polarization. In addition, the main change in the methodology is the sequence of work stages. The data obtained as a result of the conducted research served as one of the bases for setting up drilling operations at the exploration stage.

Keywords: electromagnetic sounding and induced polarization method, unmanned magnetic exploration, Krasnoyarsk Krai, Kaspinsky ore cluster, three-dimensional cascade inversion.

For citation: Trofimov I.V., Valkova E.D., Lazurchenko A.V., Stepanov A.P., Davydenko A.Yu. Development of a methodology and an optimal complex of geophysical studies when identifying ore gold promising areas within Kaspinsky ore cluster. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):204-223. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223>. EDN: KWATNN.

Введение

Красноярский край занимает одно из лидирующих мест среди регионов России по объемам добычи золота. Этот регион традиционно считается одним из самых перспективных для разработки как россыпного, так и коренного золота¹. Одной из значимых рудных областей является водораздельная зона Каспийского рудного узла, где экономическая деятельность преимущественно связана с горнодобывающими предприятиями².

Перед развитием любого направления, будь это геофизика или другая сфера деятельности человека, ставится цель, которая заключается в оптимизации рабочего процесса, что приводит к снижению себестоимости конечного продукта. Таким образом, горнодобывающая компания может позволить себе разведывать перспективные области и ввести в эксплуатацию за короткий срок.

Актуальность проведенной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных работ в схожих геологических ситуациях за счет использования современных методов геофизики. Цель исследования заключалась в оценке эффективности различных современных методов при решении задачи выделения границ интрузивных массивов и анализе тектонических нарушений. Для достижения поставленных целей был применен комплекс геофизических методов, включающий беспилотную магниторазведку, бесконтактное измерение

электрического поля (БИЭП) и электромагнитное зондирование с вызванной поляризацией.

Район исследований расположен в пределах юго-западных отрогов Восточного Саяна. Рельеф характеризуется низкогорным расчленением с абсолютными высотами от 450 до 750 м над уровнем моря. Относительные высоты водоразделов достигают 250–400 м, а крутизна склонов колеблется от 5–10° в верхней части до 20–35° в средней и нижней частях. Территория покрыта хвойными, преимущественно пихтовыми, лесами с густым подлеском и многочисленными завалами. Обнаженность пород в районе ограничена, что усложняет визуальное наблюдение за геологическими объектами (рис. 1).

В геологическом отношении рассматриваемая площадь представлена отложениями различных возрастов: рифейскими, кембрийскими, ордовикскими и четвертичными [1, 2]. Наиболее перспективной для оруденения является балахтисонская свита (Є1bl). Она состоит из рифогенных известняков светло-серых массивных пород, реже темно-серых слоистых известково-глинистых сланцев и песчаников. Нижняя часть свиты характеризуется прослаиванием темно-серых известняков, глинистых известняков, алевролитов, тогда как верхняя часть представлена массивными светлыми известняками. Отложения данной свиты отличаются неустойчивостью и часто фашиально замещают друг друга.

¹ Добыча золота в России: основные регионы и компании-лидеры // Dprom.online. Режим доступа: <https://dprom.online/popular/dobicha-zolota-v-rosseeeee-ryegeeeoni-kompaneeee/> (дата обращения: 27.03.2025).

² N-46-XVI (Артемовск). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Минусинская серия. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 215 с.

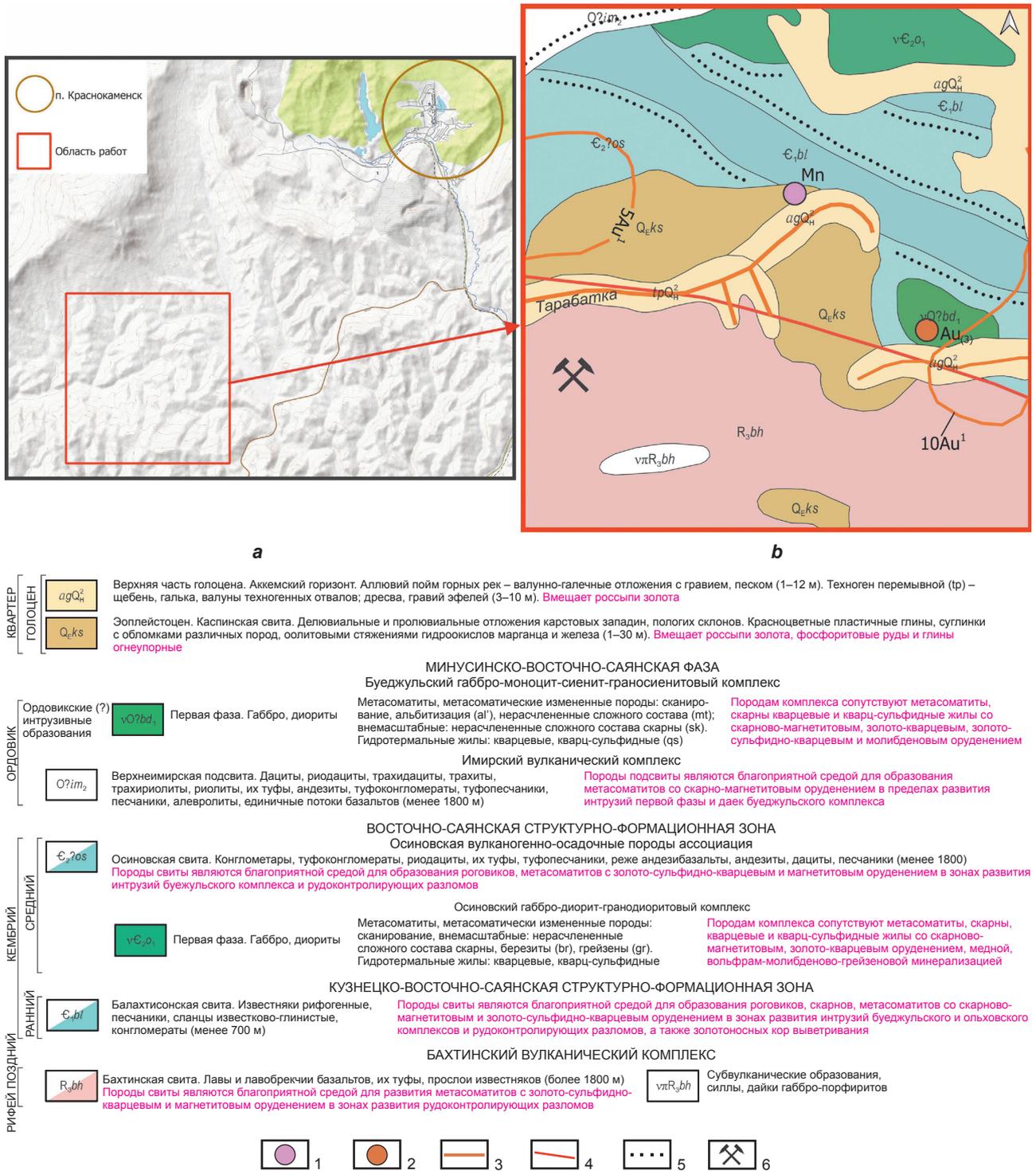


Рис. 1. Обзорная (а) и геологическая (б) карты исследуемой площади:

1 – пункт минерализации молибдена; 2 – малое проявление золота; 3 – малые месторождения россыпного золота; 4 – рудоконтролирующие разрывные нарушения; 5 – геологические границы между фациально разными образованиями с постепенным переходом; 6 – эксплуатируемое месторождение

Fig. 1. General (a) and geological (b) maps of the area under investigation:

1 – molybdenum mineralization point; 2 – minor gold occurrence; 3 – small gold placers; 4 – ore-controlling faults; 5 – geological boundaries between facies-different formations with gradual transition; 6 – producing field

Особый интерес представляет экзоконтакт карбонатных пород балахтинской свиты с интрузивными телами. Здесь породы подвергаются мраморизации и частичному скарни-

рованию. Литогеохимические исследования показывают, помимо присутствия золота, повышенное содержание марганца вблизи этих контактов [3, 4].



Материалы и методы исследования

Магниторазведочная съемка должна была позволить выделить малые диоритовые массивы Ольховского комплекса и их контакты с карбонатными отложениями балахтисонской свиты. Эти контакты являются важными контролирующими факторами для золотого оруденения. Кроме того, метод помогает выявлять основные тектонические нарушения, которые играют ключевую роль в формировании минерализации [5, 6].

Для выполнения маловысотной магниторазведочной съемки в условиях пересеченного рельефа применялся мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS с магниторазведочным оборудованием [7–9] (рис. 2). В качестве полезной нагрузки использовался высокоточный протонный оверхаузеровский магнитометр POS [10, 11].

Для обеспечения съемки с обтеканием рельефа была создана цифровая модель рельефа на основе глобального информационно-картографического продукта Intermap NextMap с разрешением 5 м на пиксель и вертикальной точностью ± 3 м (LE90). Высота съемки составила 50 м над поверхностью с учетом высоты растительности.

Полетные миссии планировались с помощью специально созданного программного обеспечения UAV Waypointer (авторами моду-

ля являются С.А. Терешкин и А.Н. Костерев), что позволило обеспечить регулярную сеть профилей с погрешностью высоты не более 10 % от номинальной и поддержанием постоянной скорости полета (рис. 3).

Магнитометрические измерения проводились с частотой 2 Гц (шаг между точками по профилю 4 м). Вариационные наблюдения выполнялись с периодом два раза в минуту, что соответствует требованиям магнитной съемки рядовой точности [12].

Для обеспечения более точной геометризации диоритовых массивов как в плане, так и в 3D, была выполнена каскадная векторная инверсия данных магнитной съемки. Суть такого подхода заключается в решении обратных задач с определением индуктивной и остаточной составляющих намагниченности для последовательно выделяемых в интерпретируемом магнитном поле локальных аномалий [13, 14].

Выделение аномалий производится по обобщенному показателю, который является взвешенной характеристикой (первой главной компонентой) показателей аномальности, полученных для площади множеством скользящих двумерных окон различного размера. В качестве показателя аномальности используется L_1 – норма вектора значений поля, полученного выборкой в окне значений централизованного относительно фона поля ΔT .



Рис. 2. Мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS
в варианте маловысотной магниторазведки

Fig. 2. Multirotor unmanned complex SibGIS UAS in the low-altitude magnetic exploration version



Рис. 3. Программный модуль UAV Waypointer для создания полетных миссий с обтеканием рельефа
Fig. 3. UAV Waypointer software module for creating flight missions with terrain flowing

Определение вектора остаточной намагниченности по выделенной аномалии возможно при известной геометрии объекта, предположениях об однородности его остаточной намагниченности и о возможных значениях магнитной восприимчивости, определяющей индуктивную составляющую поля. Для создания этих условий в алгоритме каскадной ин-

версии используются сеточные модели, что позволяет по выделенной аномалии локализовать объем ячеек, включающий потенциальный магнитный объект.

Далее организуется векторное сканирование, а именно: перебор по регулярной решетке параметров вектора остаточной намагниченности (коэффициент Кёнигсбер-



гера Q , склонение D_r и наклонение I_r). Для каждого элемента множества возможных значений этих параметров проводится инверсия локальной аномалии в соответствующий ей объем сеточной модели, что позволяет для каждого вектора остаточной намагниченности определить геометрию и магнитную восприимчивость множества ячеек, соответствующих потенциальному магнитному объекту.

Для локализации объектов используется фокусирующая инверсия магнитного поля на основе алгоритма робастной регрессии по методу эластичной сети, который основан на минимизации функционала и является взвешенной комбинацией норм L_2 и L_1 [11]. Вариант инверсии, соответствующий минимуму невязки локальной аномалии и модели инверсии, определяет значение параметров вектора остаточной намагниченности (коэффициент Кёнигсбергера Q , склонение D_r и наклонение I_r) объекта, выделенного в объеме сеточной модели.

Уточнение решения производится путем последовательного сгущения узлов задания Q , D_r , I_r , причем на каждой итерации центральный узел определяют значения параметров, найденные по полученному в результате инверсии вектору суммарной намагниченности и его индуктивной составляющей, соответствующей среднему значению магнитной восприимчивости локального объекта. Начальное приближение центрального узла задается угловыми параметрами нормального поля и ограничением сверху значения коэффициента Q (в данном случае при инверсии были приняты: максимальное значение $Q = 3$; диапазон возможных значений магнитной восприимчивости 10^{-5} – $0,1$ СИ).

В связи с тем что геометрия и магнитные свойства выделяемых последовательной инверсией объектов в той или иной мере осложнены неполным учетом влияния еще не выделенных объектов или ошибками этой же природы, внесенными уже проведенными инверсиями, проводится автоматическая коррекция полученных результатов. При этом также соблюдается принцип монотонного убывания невязки для последовательно корректируемых моделей отдельных объектов.

В процессе интерпретации линейные размеры используемых сеточных моделей и их ячеек последовательно уменьшаются,

что позволяет с помощью больших моделей исключать эффекты глубокозалегающих и законтурных магнитных неоднородностей, формирующих общий фон поля для обрабатываемой площади. Для каждой следующей модели размер ячейки уменьшается в два раза, что позволяет получать более детальные модели распределения магнитных объектов в изучаемом объеме геологической среды.

Электроразведочные работы, как и магниторазведочная съемка, должны способствовать детальному анализу более мелких разломов, а также прослеживанию распространения балахтисонской свиты (Є1bl) и исследованию распределения вызванной поляризации. Последнее особенно важно, так как зоны повышенной вызванной поляризации, предположительно, пространственно совпадают с участками оруденения [15].

В рамках данного проекта были апробированы два метода электроразведки: БИЭП как быстрый и недорогой способ изучения сопротивления горных пород верхней части разреза, и более глубокий, медленный и дорогой метод электромагнитного зондирования с вызванной поляризацией.

Преимущества метода БИЭП заключаются в отсутствии необходимости заземления и возможности работы на снегу, куруме, мерзлоте и т. д., в постоянной геометрии установки, определяющей простоту и скорость обработки данных, а также в небольшом количестве задействованных специалистов (от трех человек). Производительность такой съемки может составлять до 5 пог. км в день даже в не самых благоприятных условиях, вследствие чего стоимость работ невысока. Следовательно, в случае получения положительного результата апробации метода БИЭП на участке, в более трудоемких и дорогостоящих методах электроразведки нет необходимости. Однако небольшая глубинность исследований в совокупности с отсутствием обнаженности коренных горных пород с априори неясной мощностью перекрывающих отложений не позволяла быть уверенным в эффективности и достаточности данного метода в конкретных ландшафтно-морфологических и геологических условиях.

Работы методом БИЭП выполнялись с использованием аппаратного комплекса БИКС



[16–19], предназначенного для решения геолого-разведочных и инженерно-геологических задач. Аппаратный комплекс БИКС, краткая характеристика которого представлена в таблице, позволяет применять методы электропрофилирования и геометрического зондирования с дипольными емкостными линиями.

Шаг между пикетами составил 10 м, а между профилями – 100 м. Длина используемых диполей равнялась 10 м, расстояние между генератором и приемником составило 100 м. Расстояния между диполями фиксировались с помощью нерастягивающейся веревки (рис. 4). Данная конфигурация обеспечила получение значений кажущегося сопротивления в верхней части разреза на псевдоглубине до 50 м [20].

Особенностью такого метода электро-разведки, как электромагнитное зондирование и вызванная поляризация, является сочетание в одной системе измерений методами переходных процессов и обычных гальванических измерений на прямом токе. Установка имеет закрепленный генераторный источник и перемещающийся относительно него измеритель, подобно методам срединного градиента, но благодаря возможности моделирования можно измерять большой планшет с одной раскладки питающей линии. Данный метод предполагает гальваническое заземление и питающих, и приемных электродов, в связи с чем, несмотря на использование приемных модулей с высокоомным входом, производство измерений на курумах, на снегу и т. д. гораздо более трудоемко, чем в методах

БИЭП. Разрез возбуждается импульсами тока через электрический диполь, а разность потенциалов измеряется на приемных электродах. Метод обеспечивает глубину до 500 м и более в благоприятных геологических условиях, однако инверсия данных для систем нестационарной геометрии трудоемка, производительность полевых работ примерно в два раза ниже в методах БИЭП, соответственно, стоимость существенно выше.

Для реализации данного метода использовался аппаратно-программный электроразведочный комплекс (АПЭК) «Марс» (рис. 5), состоящий из следующих блоков [19]:

1. Генератор разнополярных импульсов тока, формирующий заданную им последовательность (включает в себя источник стабилизированного тока и коммутатор разнополярных импульсов).

2. Регистратор разности потенциалов электроразведочный, обеспечивающий сбор данных и включающий аналого-цифровой преобразователь, блок спутниковой синхронизации, модуль сохранения первичных данных и USB-интерфейс для подключения персонального компьютера.

3. Блок GPS-синхронизации для координации работы приемной и силовой аппаратуры при разнесенных источниках возбуждения и приема.

4. Управляющая программа, позволяющая контролировать качество записи на экране полевого компьютера.

Шаг между пикетами составил 25 м, а между профилями – 100 м. Для достижения глубинности исследований до 500 м и более

Краткий список характеристик аппаратного комплекса БИКС Brief list of characteristics of electric field non-contact measurement hardware complex BIKS

Аппаратный комплекс БИКС			
Генератор		Измеритель	
Рабочая частота	16,6±0,2 кГц	Рабочая частота	16,6±0,2 кГц
Амплитудные значения выходного тока	1, 3, 10 мА	Полоса пропускания	Не более 20 Гц
Точность стабилизации выходного тока	±5 %	–	–

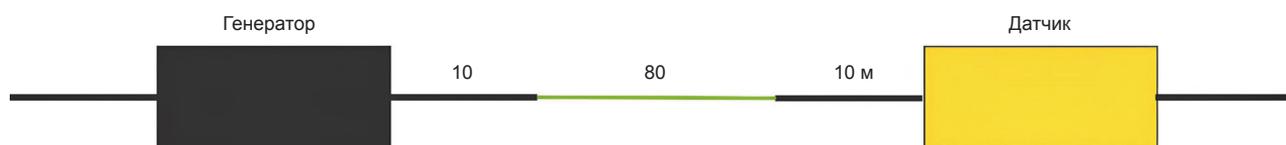


Рис. 4. Схема рабочей установки
Fig. 4. Working installation diagram

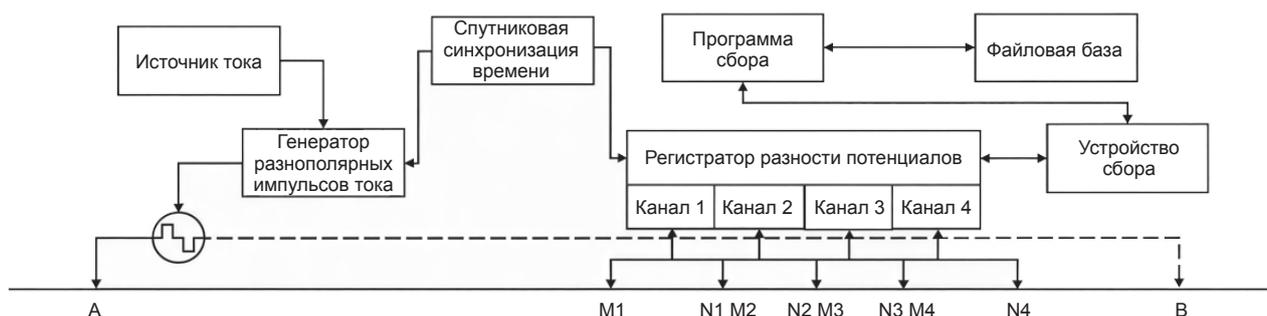


Рис. 5. Схема аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» на примере с четырехканальным регистратором разности потенциалов
Fig. 5. Diagram of “Mars” hardware and software electrical exploration complex on the example of four-channel potential difference recorder

применялась технология регистрации нестационарного электромагнитного поля. Длина питающей линии АВ составила 2905 м, а период прямоугольного разнополярного импульса равнялся 1 с (импульс – 250 мс, пауза – 250 мс).

Для оценки качества выполненных исследований были проведены контрольные измерения в объеме 5 % от общего объема работ. Полученные результаты показали следующее:

1. Среднеквадратическое отклонение по методу БИЭП составило менее 5 Ом·м.

2. По методу беспилотной магниторазведки отклонение не превысило 5 нТл.

3. По методу электромагнитного зондирования и вызванной поляризации средняя сходимость, рассчитанная по всему временному диапазону кривой становления, осталась в пределах допустимых 5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

На начальном этапе обработки исходные данные магнитометрической съемки, полученные с использованием беспилотного летательного аппарата, были проанализированы и отсортированы. Дальнейшая обработка включала следующие шаги:

1. Внесение вариационных и аппаратных поправок для коррекции данных.

2. Выделение классов подлетно-разворотных маршрутов, рядовых и контрольных профилей.

3. Увязка и разбраковка маршрутных наблюдений.

Для выявления особенностей геологического строения и детального анализа точечных аномалий была рассчитана локальная составляющая магнитного поля. Метод раз-

деления поля основан на расчетах средних значений в скользящем окне изменяемого радиуса, осуществляет частотную селекцию исходного поля и дает возможность выделения региональной и локальной составляющих заданной частоты. В зависимости от радиуса скользящего окна обеспечивается возможность выбора аномалий из спектра частот исследуемого поля либо интервала глубин залегания горных пород. Магнитное поле разделено на региональную и локальную составляющие путем осреднения в скользящем окне, радиус осреднения 150 м. Результат первичной обработки данных представлен на рис. 6.

Карта локальной составляющей магнитного поля дает представление о строении верхней части разреза. Она акцентирует зоны наибольшего изменения поля, что указывает на наличие вертикальных границ в разрезе (различные штокверки и т. д.).

На карте четко видны мелкие детали геологического строения. Контуры локальных магнитных аномалий отражают изменения литологического состава пород, а также зоны тектонических нарушений.

Перед построением карт распределения кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) выполняется привязка всех измерений к абсолютным координатам. Это обеспечивает точное географическое позиционирование полученных данных. Далее проводится фильтрация всего объема информации для исключения забракованных точек измерения, что повышает достоверность полученной карты. При использовании одного разноса длиной 100 м методом БИЭП строится карта распределения кажущегося УЭС на глубине, равной половине разноса (50 м) (рис. 7).

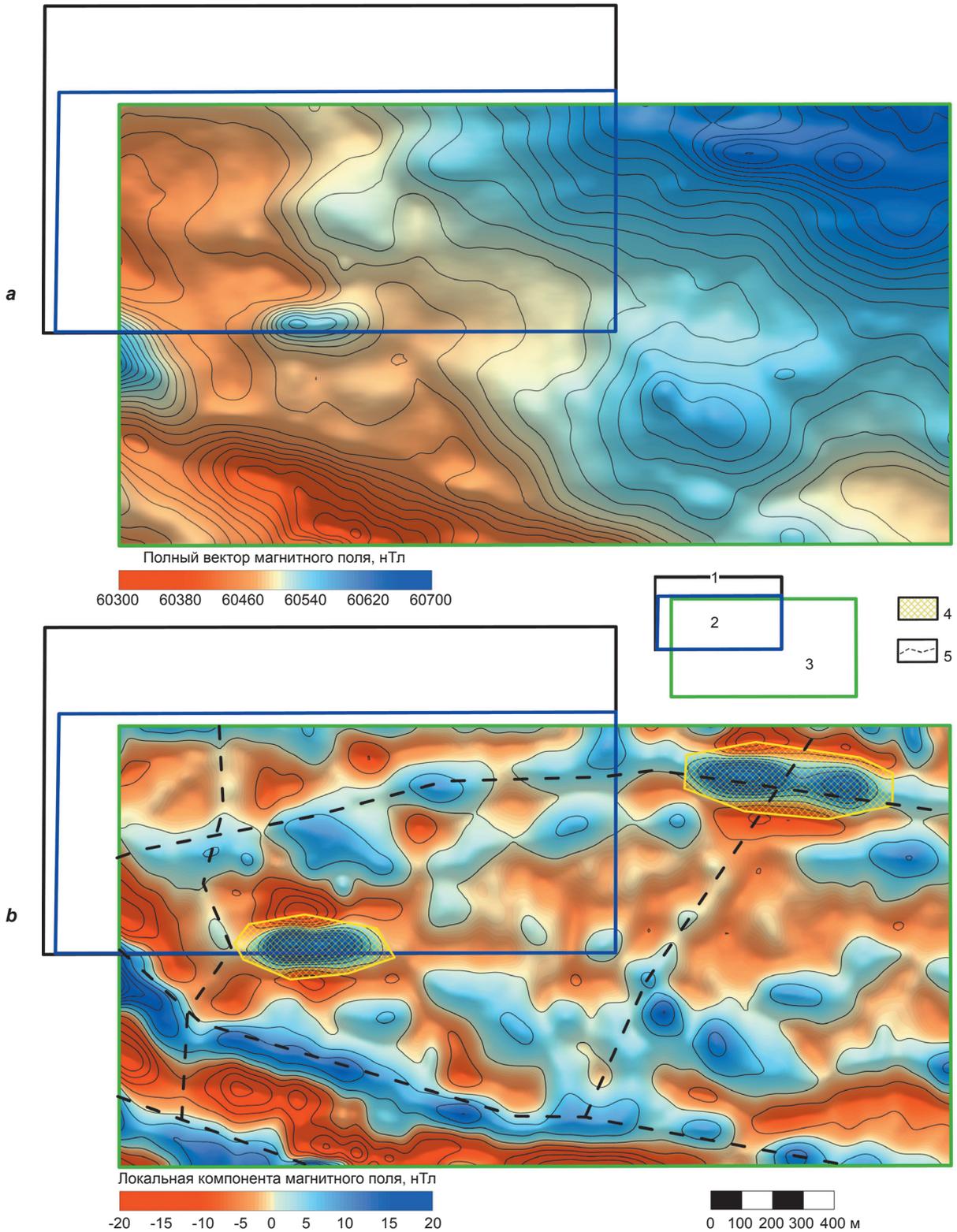


Рис. 6. Карты полного вектора магнитного поля (а) и локальной составляющей магнитного поля (б):
 1 – контур участка применения метода электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;
 2 – контур участка применения метода бесконтактного измерения электрического поля; 3 – контур участка магниторазведки; 4 – перспективные аномальные зоны по данным магниторазведки;
 5 – предполагаемые разломные зоны

Fig. 6. Maps of the full magnetic field vector (a) and the local component of the magnetic field (b):
 1 – contour of the application area of the electromagnetic sounding and induced polarization method;
 2 – contour of the application area of the non-contact electric field measurement method; 3 – contour of the magnetic exploration area; 4 – promising anomalous zones according to magnetic exploration data;
 5 – assumed fault zones

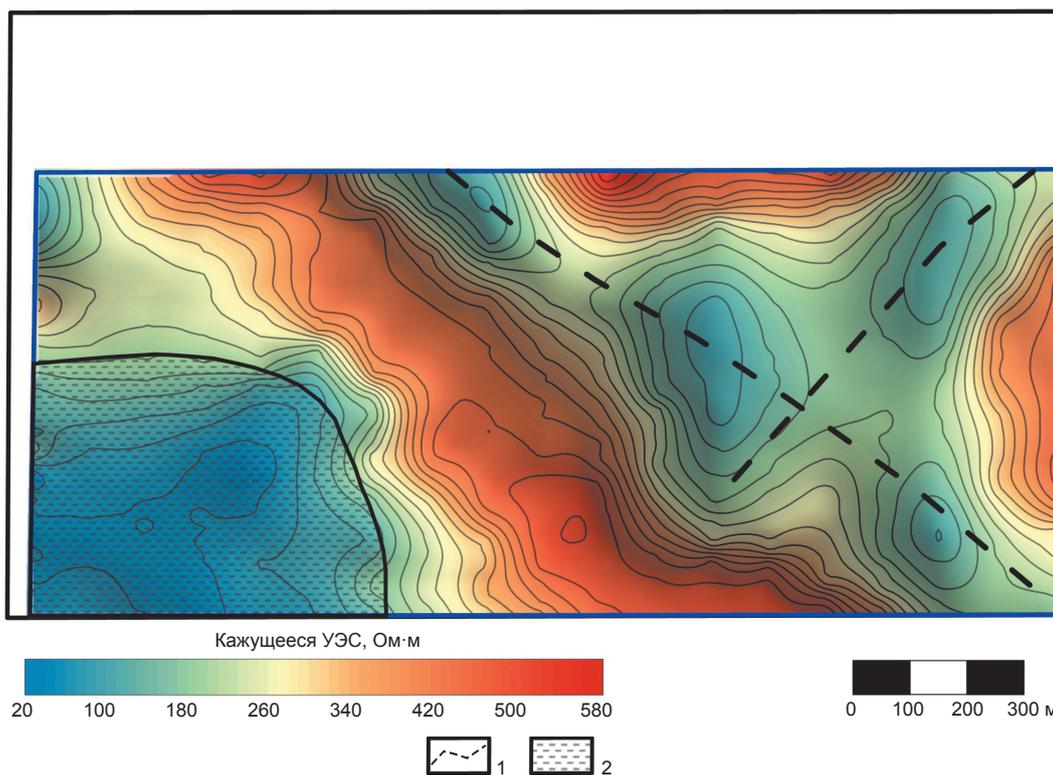


Рис. 7. Карта распределения кажущегося удельного электрического сопротивления (метод бесконтактного измерения электрического поля):

1 – предполагаемые разрывные нарушения; 2 – заболоченная область

Fig. 7. Map of apparent specific electrical resistance distribution (method of non-contact electric field measurement):

1 – assumed faults; 2 – swampy area

На полученной карте четко прослеживаются структуры с различными значениями УЭС:

– зоны с высокими значениями сопротивления, которые могут указывать на наличие малопористых или маловодных пород, таких как интрузивные массивы;

– области с низкими значениями сопротивления, которые ассоциируются с гидротермально измененными породами, трещиноватыми зонами или участками, насыщенными водой.

Таким образом, метод БИЭП позволил картировать приповерхностные разломы и, возможно, проследить зону разрушения интрузивного массива.

Совместная интерпретация метода бесплотной магниторазведки и БИЭП, которые основываются на разных законах, является очень важным этапом. Такой анализ позволяет учесть все особенности строения участка. Так, более глубокий метод (магниторазведка) видит большинство разрывных нарушений, которые скрыты мощным слоем четвертичных отложений, но может пропустить нарушения в самой верхней части участка (10–30 м). В таком случае использование метода БИЭП

позволит выделить пропущенные разломные зоны (рис. 8).

Разломы, которые выделяются по методам, имеющим разную глубинность, могут не сходиться точь-в-точь. Это может быть обусловлено углом падения разлома. Первичная обработка данных электромагнитных зондирований с вызванной поляризацией включает в себя четыре этапа.

1. Очистка данных: удаление испорченных реализаций, которые не соответствуют критериям качества.

2. Подавление шумов: снижение влияния промышленных помех для повышения точности результатов.

3. Робастная фильтрация: применение двумерного скользящего окна для выравнивания данных и исключения аномалий.

4. Интеграция: объединение обработанных данных в результирующую кривую для последующего анализа.

На основе полученных после первичной обработки данных строятся карты кажущихся параметров, которые позволяют оценить электрические свойства подземных сред на различных глубинах (рис. 9).

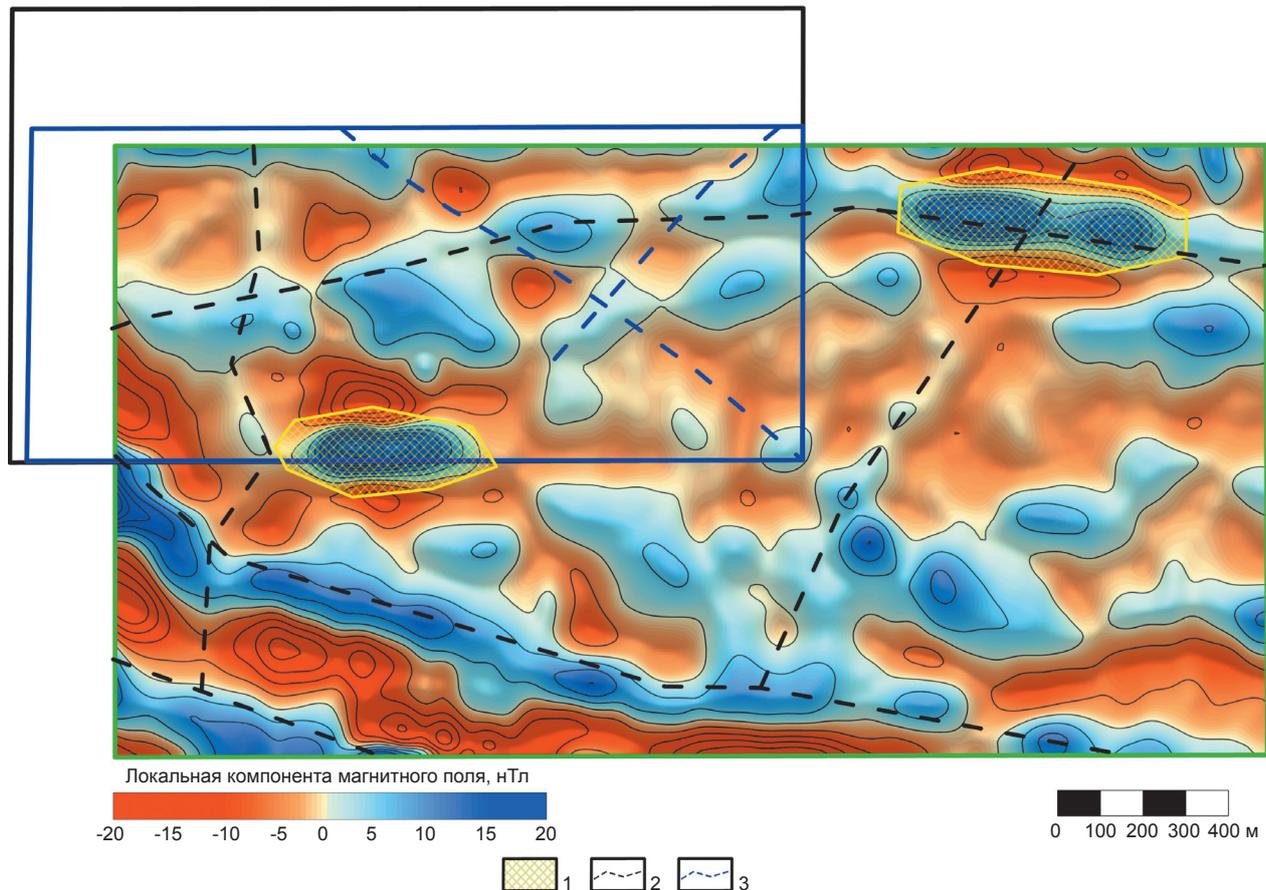


Рис. 8. Совместная интерпретация данных, полученных с помощью беспилотной магниторазведки и метода бесконтактного измерения электрического поля:

1 – перспективные аномальные зоны, выделенные по данным магниторазведки; 2 – предполагаемые разрывные нарушения, выделенные по данным магниторазведки; 3 – предполагаемые разрывные нарушения по данным, полученным с помощью метода бесконтактного измерения электрического поля

Fig. 8. Combined interpretation of data obtained using unmanned magnetic exploration and non-contact electric field measurement method:

1 – promising anomalous zones identified according to magnetic exploration data; 2 – assumed faults identified according to magnetic exploration data, 3 – assumed faults according to the data obtained using the method of non-contact electric field measurement

Предположительно, высокоомные аномалии связаны с телами габбро-диоритов Ольховского комплекса в верхней части разреза. Поляризуемость, как уже было сказано, выделяет экзоконтакт Ольховского комплекса с карбонатными отложениями балахтисонской свиты и показывает степень его проявления.

В отличие от предыдущего случая анализа магниторазведочных данных и метода БИЭП, одна из задач, которая была поставлена при совместной интерпретации данных методов БИЭП и электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, заключалась в подтверждении или опровержении выделенных разрывных нарушений ранее методом БИЭП (рис. 10). Схожие разломные области, которые были получены двумя электроразведоч-

ными методами, имеющие разный принцип действия, будут являться подтверждением наличия разломных структур.

Результаты, полученные с помощью методов электромагнитного зондирования и вызванной поляризации и БИЭП, демонстрируют слабую корреляцию между собой. По всей видимости, это связано с наличием на площади глин большой мощности, которые способствуют накоплению влаги. В результате низкоомный слой выступает в роли своеобразного экрана для метода БИЭП, что существенно снижает глубинность исследования. Метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, в отличие от метода БИЭП, позволил изучить более глубокие горизонты и получить данные о строении коренных пород.

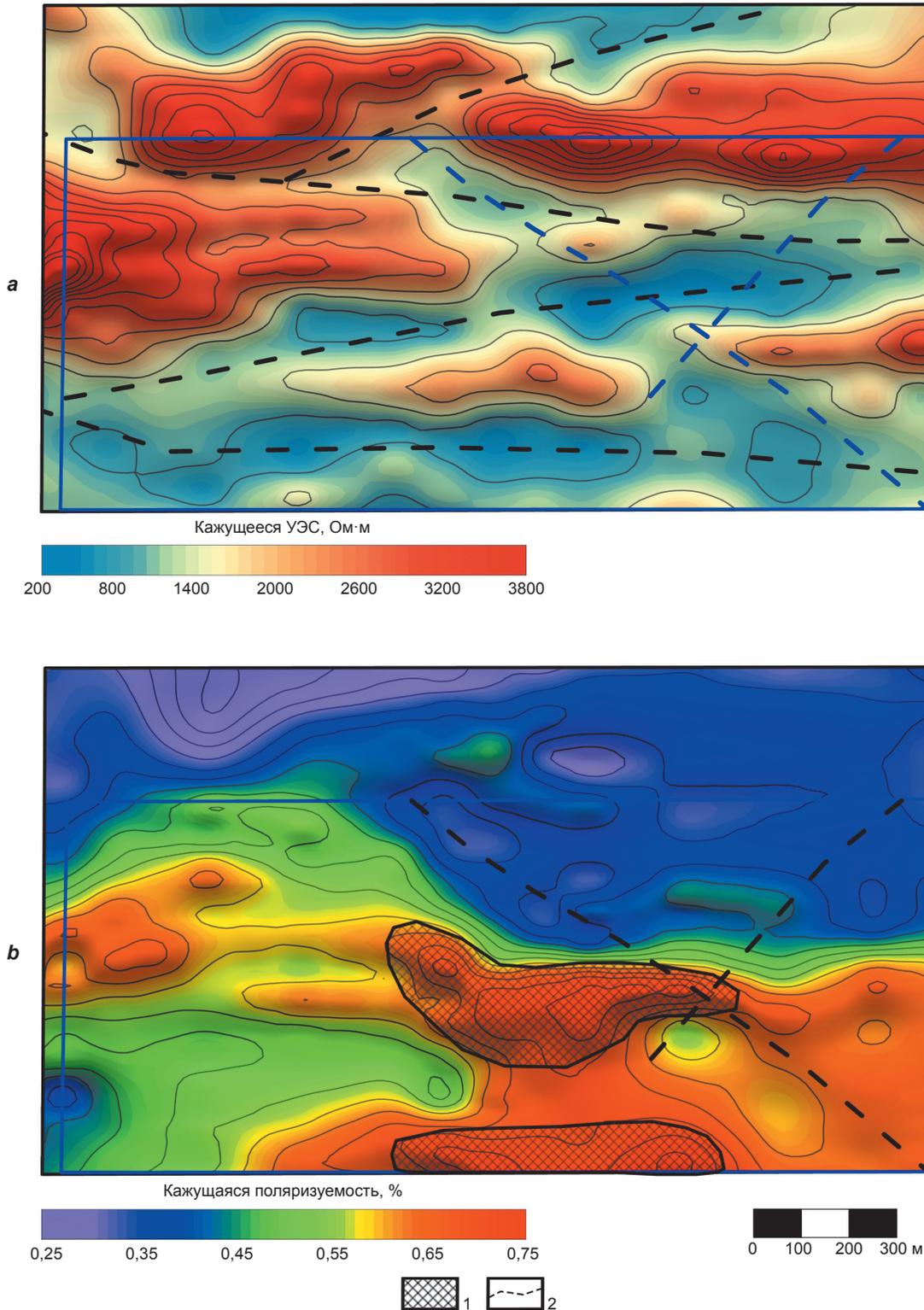


Рис. 9. Карты распределения кажущихся параметров, полученных методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:
 а – кажущееся удельное электрическое сопротивление; б – кажущаяся вызванная поляризуемость
 1 – перспективные рудоконтролирующие аномальные зоны по данным электромагнитного зондирования;
 2 – предполагаемые разломные зоны

Fig. 9. Distribution maps of apparent parameters obtained by electromagnetic sounding method and induced polarization:
 а – apparent specific electrical resistance, б – apparent induced polarizability
 1 – promising ore-controlling anomalous zones according to electromagnetic sounding data;
 2 – assumed fault zones

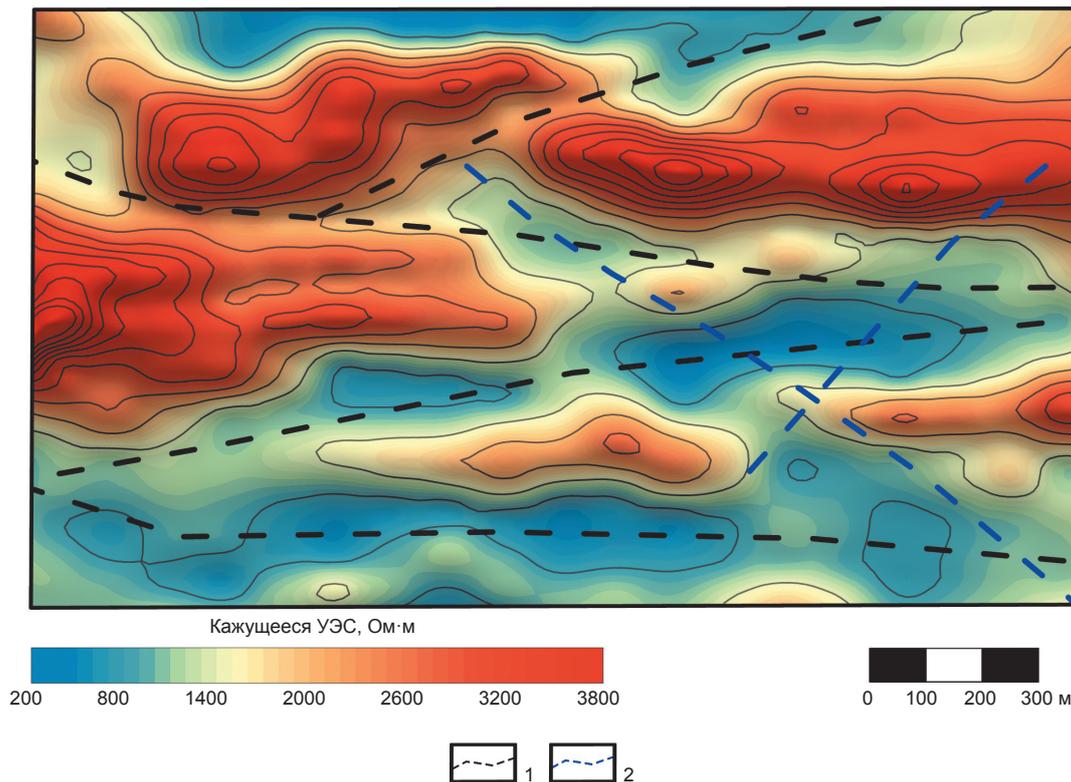


Рис. 10. Совместная интерпретация полученных электроразведочных данных:
1 – разрывные нарушения по данным, полученным методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 2 – разрывные нарушения по данным, полученным методом бесконтактного измерения электрического поля

Fig. 10. Combined interpretation of the obtained electrical exploration data:
1 – faults according to the data obtained by the electromagnetic sounding method and induced polarization;
2 – faults according to the data obtained by the non-contact electric field measurement method

Поскольку одним из ключевых параметров при поиске интрузивных массивов являлся именно параметр вызванной поляризации, он был использован для выделения перспективных зон наряду с данными магниторазведки. Это обеспечило более комплексный подход к интерпретации геологической структуры исследуемой территории.

Одним из заключительных этапов работы стала разработка схемы интерпретации, на которой были обозначены (рис. 11):

- зоны линейных аномалий, связанных с тектоническими нарушениями;
- предполагаемая граница интрузии;
- перспективные области для дальнейшего исследования.

Помимо схемы интерпретации, была выполнена трехмерная инверсия магниторазведочных данных в программе QDI Карра. Целью выполнения инверсии являлась локализация интрузивных тел в верхней части разреза (на глубину до 350 м).

В процессе выполнения каскадной инверсии магниторазведочных данных в QDI Карра в диапазоне горизонтов 215–570 м использовалась сеточная модель с размером ячеек 25×25×25 м, а верхняя часть в диапазоне 380–570 м детализировалась моделью с ячейками 12,5×12,5×12,5 м. Размеры ячеек подбираются интерпретатором, исходя из задачи и понимания геологической ситуации. Так, для решения задачи по поиску небольших тел необходимо прийти к максимально малым размерам ячеек. Если же тела имеют большие размеры, то нет смысла приходить к таким же ячейкам, которые описаны в работе (для сохранения рабочего времени).

Результаты инверсии показывают возможность выделения перспективных зон (рис. 12, 13) повышенными значениями коэффициента Кёнигсбергера, что, в свою очередь, отражает существование геологических факторов (гидротермальные процессы), повлиявших на остаточную намагниченность пород этих зон.

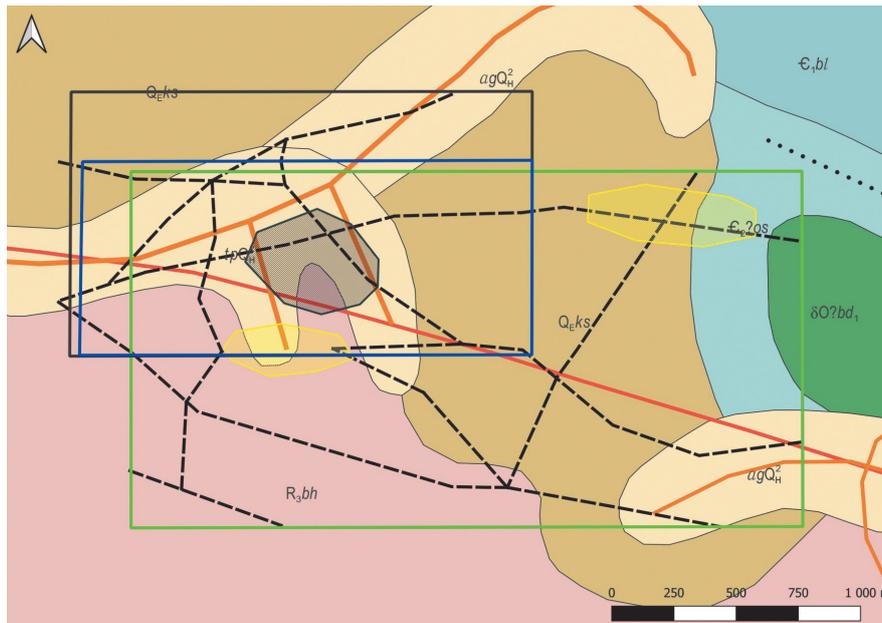


Рис. 11. Схема интерпретации геофизических данных:

1 – перспективные зоны первого порядка; 2 – перспективная зона второго порядка; 3 – выделенные разрывные нарушения на основе геофизических данных; 4 – граница беспилотной магниторазведки; 5 – граница бесконтактного измерения электрического поля; 6 – граница электромагнитного зондирования и вызванной поляризации

Fig. 11. Diagram of geophysical data interpretation:

1 – first-order promising zones; 2 – second-order promising zone; 3 – faults identified on the basis of geophysical data; 4 – unmanned magnetic exploration boundary; 5 – boundary of non-contact electric field measurement; 6 – boundary of electromagnetic sounding and induced polarization

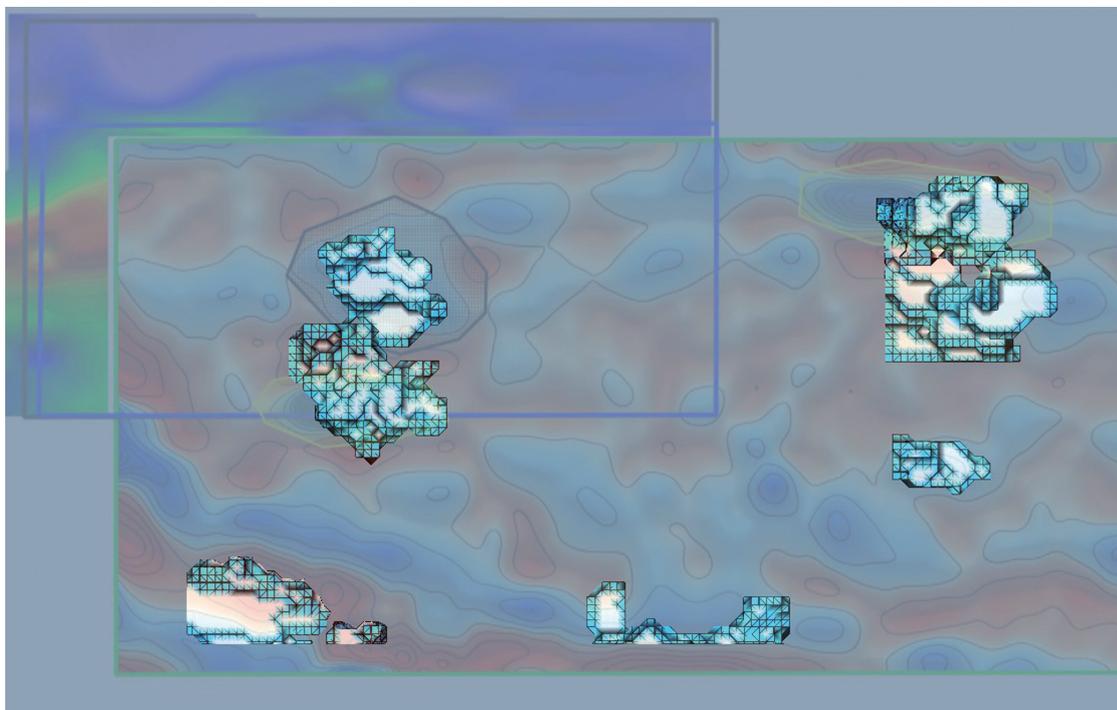


Рис. 12. Пространственные взаимоотношения повышенных значений параметра Q, полученных по результатам инверсии QDI Карра с локальными магнитными аномалиями и рудоконтролирующими зонами

Fig. 12. Spatial relationships of elevated Q parameter values obtained from QDI Kappa inversion with local magnetic anomalies and ore-controlling zones

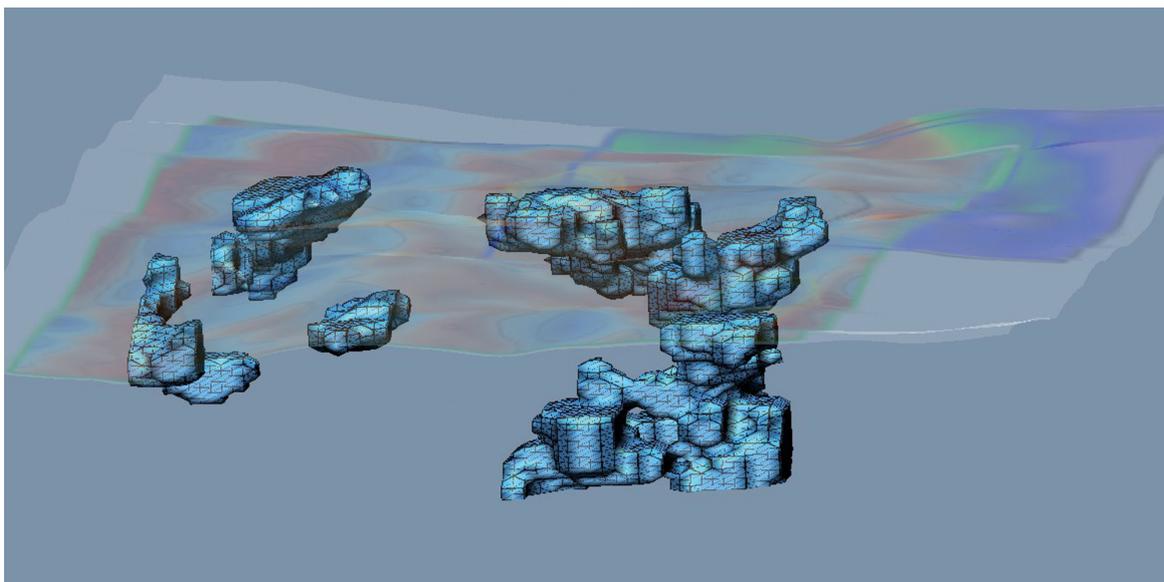


Рис. 13. Трехмерная визуализация областей повышенных значений параметра Q в сопоставлении с локальной составляющей магнитного поля

Fig. 13. Three-dimensional visualization of the areas of increased Q parameter values in comparison with the local component of the magnetic field

Трехмерная инверсия магниторазведочных данных позволила подтвердить перспективность выделенных областей (см. рис. 9) за счет локализации интрузивных тел участками повышенных значений параметра Q . Возможность подобной локализации показывает, что выполнение каскадной инверсии магнитного поля должно предшествовать выбору участков для выполнения электроразведочных работ.

Заключение

Выполненный комплекс исследований позволил определить местоположение малых диоритовых массивов Ольховского комплекса. Тем не менее для более точного установления характера залегания и параметров этих тел требуются дополнительные исследования.

Проведенная работа помогла выявить ключевые особенности строения района, связанные с тектоническими нарушениями, интрузивными телами и зонами гидротермальной метасоматозной минерализации. Полученные данные послужили основой для дальнейшей детальной разведки перспективных участков.

Представленный геофизический комплекс методов, хоть и позволил выявить все перспективные зоны на исследуемой площади, но не является окончательным. По результатам проведенных работ были сделаны следующие методические выводы:

1. На основе качественной и количественной интерпретации данных аэромагнитной съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов были выделены предполагаемые границы интрузивного тела Ольховского комплекса, не выходящего на поверхность. В этой области отмечаются локальные аномалии с повышенными значениями магнитного поля, выявлены зоны тектонических нарушений северо-западного простирания, которые играют ключевую роль в контроле распространения большинства интрузивных тел Ольховского комплекса. Предполагается, что вдоль тектонических нарушений протягиваются линейные зоны гидротермально измененных пород, которые связаны с золотым оруденением.

2. Методы малоглубинной электроразведки, такие как БИЭП, не рекомендуются к постановке в подобных условиях ввиду малого количества полезной информации и проблем в интерпретации, связанных с массивным наличием приповерхностных обводненных зон. Несмотря на то, что такие методы быстры и недороги, геологический эффект от них минимален. Более предпочтительным в данном случае является более дорогостоящий метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. При этом следует отметить, что необходимые выводы не требовали проведения инверсии. Таким образом, следует либо выполнять трехмерную инверсию электроразведочных данных, либо заменить ме-



тод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, позволяющий получить численную характеристику значений вызванной поляризации, на метод, который будет позволять получать лишь качественную характеристику. Это позволит уменьшить стоимость электроразведочных работ и по сравнению с выполнением дальнейшей трехмерной инверсии сократит срок проведения работ.

3. Стадийность работ и граф обработки должна быть следующей:

1) проведение анализа геологической и геофизической информации с последующей беспилотной магниторазведкой;

2) выполнение беспилотных магниторазведочных работ, дальнейшая трехмерная каскадная инверсия данных и интерпретация данных, выделение перспективных областей с

положительным знаком в локальной составляющей поля и положительным параметром Q , помимо выделения областей, требуется выделить разломы (данный этап является основополагающим для дальнейшей постановки электроразведочных работ, так как именно на основе полученных данных выбирается будущая площадь для выполнения электроразведки);

3) выполнение электроразведочных работ и проведение совместного геофизического анализа с получением результатов магниторазведки, выделение областей с повышенной вызванной поляризацией и разрывными нарушениями;

4) построение схемы интерпретации геофизических работ для дальнейшего изучения перспективных областей.

Список источников

1. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 1. С. 80–86. EDN: RWQLIZ.
2. Гусев А.И. Геолого-генетическая модель Синохинского золото-медно-скарнового месторождения // Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых: материалы науч. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2000. С. 104–108.
3. Соловьев Г.А. Петрофизическая классификация рудных месторождений // Геология и разведка. 1991. № 6. С. 22–29.
4. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Магнито-геологические модели золоторудных тел и возможности магнитометрии при их разведке // Минерагения Северо-Восточной Азии: материалы II Всеросс. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Экос, 2011. С. 46–47.
5. Приходько А.Ю. Условия формирования золоторудных месторождений по геофизическим данным // Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые: тезисы докладов Междунар. геофизической конф. (г. Санкт-Петербург, 2–6 октября 2006 г.). СПб.: Издательство Welcome, 2006. С. 284–285.
6. Чупров В.В. [и др.]. Геолого-геофизическая классификация рудных объектов при общих и детальном поисках // Советская геология. 1982. № 4. С. 24–28.
7. 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://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
8. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений Урана // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 59–64. EDN: YTHJUE.
9. 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://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.
10. Сапунов В.А., Денисов А.Ю., Савельев В.В., Киселёв С.Е., Нархов Е.Д., Сергеев А.В. [и др.]. Модернизация наземных оверхаузеровских магнитометров POS для использования на беспилотных аэроносителях коптерного типа // Инженерная и рудная геофизика 2020: материалы 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020» (г. Пермь, 14–18 сентября 2020 г.). Пермь: ЕАГЕ «Геомодель», 2020. С. 99. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051124>. EDN: DQTTXQ.
11. Sapunov V., Bondarev E., Denisov A., Narkhov E., Sergeev A., Fedorov A., et al. UAV overhauser sensors and magnetometers: results and development prospects // Developments and Advances in Defense and Security. Proceedings of MICRADS 2024 / eds Á. Rocha, A. Vaseashta. Springer, 2025. Vol. 423. P. 331–345.
12. Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhetskaya A.K. Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) – the main points and the authors' comments // GeoBaikal 2018: conference materials (Irkutsk, 11–17 August 2018). European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802012>.
13. Давыденко А.Ю. Определение остаточной и индуктивной намагниченности объектов на основе каскадной инверсии данных магнитных съемок // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитаци-



онных магнитных и электрических полей: сборник науч. трудов. Пермь: Изд-во ГИ УроРАН, 2025. Вып. 1. С. 95–99. EDN: XTVUJG.

14. Давыденко А.Ю. Инверсия магнитного поля на основе эластичной сети и векторного сканирования для оценки магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности трехмерных объектов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 47-й сессии Междунар. науч. семинара Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова (г. Воронеж, 27–30 января 2020 г.). Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2020. С. 105–110. EDN: SSQCEL.

15. Zou H., Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net // *Journal of the Royal Statistical Society B. (Statistical Methodology)*. 2005. Vol. 67. Iss. 2. 301–320. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.

16. Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // *Разведка и охрана недр*. 2002. № 10. С. 36–40.

17. Груздев А.И., Бобачев А.А. Особенности применения бесконтактных измерений в методе сопротивлений // *Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития: материалы конф.* (г. Сочи, 28 сентября – 2 октября 2015 г.). М.: Изд-во ЕАГО, 2015. С. 178–183. EDN: UMRFSR.

18. Груздев А.И. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // *Инженерные изыскания*. 2014. № 9-10. С. 32–37. EDN: TEGEUV.

19. Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О. Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 3. С. 248–261. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA

20. Пат. № 2574861, Российская Федерация, G01V 3/08. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении поля электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А. Давыденко, А.Ю. Давыденко, И.Ю. Пестерев, С.В. Яковлев, М.А. Давыденко, А.В. Комягин [и др.]. Заявл. 01.08.2012; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.

References

1. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geological and geophysical conditions at Siberian golden ore fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2014;324(1):80-86. (In Russ.). EDN: RWQLIZ.

2. Gusev A.I. Geological and genetic model of the Sinyukhinsky gold-copper-skarn deposit. In: *Poiski i razvedka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: materialy nauch. konf. = Prospecting and exploration of mineral deposits: Proceedings of the scientific conference*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2000, p. 104-108. (In Russ.).

3. Soloviev G.A. Petrophysical classification of ore deposits. *Geologiya i razvedka*. 1991;6:22-29. (In Russ.).

4. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Magnetogeological models of gold ore bodies and magnetometry potential in their exploration. In: *Minerageniya Severo-Vostochnoi Azii: materialy II Vseross. nauch.-prakt. konf. = Minerageny of North-East Asia: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference*. Ulan-Ude: Ekos; 2011, p. 46-47. (In Russ.).

5. Prikhod'ko A.Yu. Formation conditions of gold ore deposits according to geophysical data. In: *Geofizicheskie issledovaniya na tverdye poleznye iskopaemye: tezisy dokladov Mezhdunar. geofizicheskoi konf. = Geophysical research for solid minerals: abstracts of the International geophysical conference*. 2–6 October 2006, St. Petersburg. St. Petersburg: Izdatel'stvo Welcome; 2006, p. 284-285. (In Russ.).

6. Chuprov V.V., et al. Geological and geophysical classification of ore objects in general and detailed exploration. *Sovetskaya geologiya*. 1982;4:24-28. (In Russ.).

7. 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. *Geografya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

8. Parshin A.V., Grebenkin N.A., Morozov V.A., Rzhetskaya A.K., Shikalenko F.N. The first results of methodological work on the application of bespilot airborne geophysical technologies at the stage of prospecting of uranium deposits. *Prospect and protection of mineral resources*. 2017;11:59-64. (In Russ.). EDN: YTHJUE.

9. 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. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):182-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.

10. Sapunov V.A., Denisov A.Y., Savelyev V.V., Kiselev S.E., Narkhov E.D., Sergeev A.V., et al. Modernization of ground-based overhauser POS magnetometers to use on small unmanned copter-type aerial vehicles. In: *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2020: materialy 16-i nauch.-prakt. konf. sovместно s seminarom «Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2020» = Engineering and ore geophysics 2020: proceedings of the 16th scientific and practical conference in combination with the seminar “Engineering and Ore Geology 2020”*. 14–18 September 2020, Perm. Perm: Geomodel; 2020, p. 99. (In Russ.). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051124>. EDN: DQTTXQ.

11. Sapunov V., Bondarev E., Denisov A., Narkhov E., Sergeev A., Fedorov A., et al. UAV overhauser sensors and magnetometers: results and development prospects. In: Rocha Á., Vaseashta A. (eds). *Developments and Advances in Defense and Security. Proceedings of MICRADS 2024*. Springer; 2025, vol. 423, p. 331-345.



12. Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhevskaya A.K. Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) – the main points and the authors' comments. In: *GeoBaikal 2018: conference materials*. 11–17 August 2018, Irkutsk. European Association of Geoscientists & Engineers; 2018, p. 1-7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802012>.

13. Davydenko A.Yu. Determination of residual and inductive magnetization of objects based on cascade inversion of magnetic survey data. In: *Theoretical and Practical Issues of Geological Interpretation of Gravitational Magnetic and Electric Fields: Collected scientific papers*. Perm: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Mining Institute; 2025, vol. 1, p. 95-99. (In Russ.). EDN: XTVUJG.

14. Davydenko A.Yu. Magnetic field inversion based on elastic net and vector scanning to estimate 3D object magnetic susceptibility and remanent magnetization. In: *Materialy 47-i sessii Mezhdunar. nauch. seminara D.G. Uspenskogo – V.N. Strakhova = Materials of the 47th session of D.G. Uspensky – V.N. Strakhov International scientific seminar*. 27–30 January 2020, Voronezh. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2020, p. 105-110. (In Russ.). EDN: SSQCEL.

15. Zou H., Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society B (Statistical Methodology)*. 2005;67(2):301-320. (In Russ.). <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.

16. Bobachev A.A. Electric field features in the air during low-frequency contactless electrical sounding. *Prospect and protection of mineral resources*. 2002;10:36-40. (In Russ.).

17. Gruzdev A.I., Bobachev A.A. Application features of non-contact measurements in resistance method. In: *Inzhenernaya, ugol'naya i rudnaya geofizika-2015. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy konf. = Engineering, coal and ore geophysics-2015. Current status and development prospects: conference proceedings*. 28 September – 2 October 2015, Sochi. Moscow: Interregional Public Organization Euro-Asian Geophysical Society; 2015, p. 178-183. (In Russ.). EDN: UMRFSR.

18. Gruzdev A.I. Comparison of different methods of contact and non-contact measurements in the midland of Russia. *Engineering Survey*. 2014;9-10:32-37. (In Russ.). EDN: TEGEUV.

19. Trofimov I.V., Bashkeev A.S., Savchenko V.A., Konshin I.O. Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):248-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA.

20. Davydenko J.A., Davydenko A.J., Pesterev I.J., Jakovlev S.V., Davydenko M.A., Komjagin A.V., et al. *Method of measuring and processing transient processes with grounded line during pulse field excitation with electric dipole to construct geoelectric sections and apparatus for carrying out said method using hardware-software electrical logging system (АРЕК «МАRS»)*. Patent RF, no. 2574861; 2016. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Трофимов Илья Владимирович,
младший научный сотрудник,
институт «Сибирская школа Геонаук»
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>

Ilya V. Trofimov,
Junior Researcher,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>



Валькова Евгения Денисовна,
инженер департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>

Evgeniya D. Valkova,
Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>



Лазурченко Антон Витальевич,
младший научный сотрудник департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>

Anton V. Lazurchenko,
Junior Researcher of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>



Степанов Александр Петрович,
ведущий инженер департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
stepanovap@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-5271-1128>

Aleksandr P. Stepanov,
Lead Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
stepanovap@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-5271-1128>



Давыденко Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
профессор кафедры динамической геологии,
Иркутский государственный университет,
г. Иркутск, Россия,
davydenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1751-6682>

Aleksandr Yu. Davydenko,
Dr. Sci. (Phys. & Math.),
Professor of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Professor of the Department of Dynamic Geology,
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia,
davydenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1751-6682>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Трофимов – разработка концепции, обработка данных, редактирование рукописи.
Е.Д. Валькова – написание черновика рукописи.
А.В. Лазурченко – визуализация, обработка данных.
А.П. Степанов – курирование данных.
А.Ю. Давыденко – проведение исследования.
Ilya V. Trofimov – conceptualization, data analysis, writing – editing.
Evgeniya D. Valkova – writing – original draft.
Anton V. Lazurchenko – visualization, data analysis.
Aleksandr P. Stepanov – data curation.
Aleksandr Yu. Davydenko – investigation.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict 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 27.03.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 27.05.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 27.05.2025.