

Научная статья

УДК 550.814:550.83(1/9)

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_53-68

Ключевые слова: беспилотная геофизика, беспилотная электроразведка, частотное зондирование, поиски твердых полезных ископаемых, геологическое картирование, инженерная геофизика

Благодарности: авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Геологического факультета МГУ Игорю Николаевичу Модину за предоставленную возможность провести тестовые измерения на полигоне «Александровка», геологические материалы и данные электротомографии, а также за полезные замечания по интерпретации полученных данных. Авторы признательны Михаилу Александровичу Шишкину (Институт Карпинского) за помощь в подготовке геологического обоснования проведения съемки в Магаданской области и в геологической интерпретации полученных данных.

Для цитирования: Анташук К. М., Атаков А. И., Кочеров А. Б., Голубев С. А., Теремков А. В. Беспилотные геофизические исследования при решении региональных, поисковых и инженерных геологических задач // Региональная геология и металлогения. 2026. Т. 33, № 2. С. 53–68. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_53-68

Original article

UDC 550.814:550.83(1/9)

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_53-68

Keywords: UAV-based geophysics, UAV-based electromagnetic surveying, controlled source electromagnetic method, mineral prospecting, geological mapping, nearsurface geophysics

Acknowledgments: the authors are grateful to Igor N. Modin, DSc (Engineering), Professor of the Faculty of Geology at MSU, for granting an opportunity to make test measurements on the Aleksandrovka field test site, for the provided geological data and electrical resistivity tomography data, as well as useful comments on the obtained data interpretation. The authors thank Mikhail A. Shishkin (Karpinsky Institute) for assisting in providing geological grounds for making surveys in Magadan Region and in the geological interpretation of the obtained data.



Беспилотные геофизические исследования при решении региональных, поисковых и инженерных геологических задач

К. М. Анташук¹, А. И. Атаков²✉, А. Б. Кочеров²,
С. А. Голубев², А. В. Теремков³

¹ Независимый исследователь

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия, aleksei_atakov@karpinskyinstitute.ru✉

³ ООО «АЛПОМ»,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена обзору современных возможностей беспилотных геофизических методов при решении широкого круга геологических задач: от картирования больших площадей до малоглубинных исследований. Основной акцент сделан на применении новой технологии беспилотной электроразведки, разработанной авторами и направленной на изучение больших участков (до первых сотен км²) на глубинах до 500–800 м. Приведен обзор разработанной технологии и аппаратного комплекса. Рассмотрены результаты применения комплекса беспилотных геофизических методов на нескольких участках. На основе полученных данных показаны возможности применяемых беспилотных технологий. Обозначены направления развития с учетом опубликованного опыта зарубежных и российских коллег.

UAV-based geophysics for geological mapping, mineral exploration, and nearsurface investigations

K. M. Antashchuk¹, A. I. Atakov²✉, A. B. Kocherov²,
S. A. Golubev², A. V. Teremkov³

¹ Independent researcher

² All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russia, aleksei_atakov@karpinskyinstitute.ru✉

³ Alpom, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article reviews the current capabilities of unmanned aerial vehicle (UAV-based) geophysical methods for solving a broad spectrum of geological tasks, ranging from regional-scale mapping to shallow-depth investigations. The primary focus is on the authors' novel UAV-based electromagnetic surveying technology aimed at exploring large areas (covering several hundred square kilometers) at depths of 500–800 meters. The authors concisely describe the methodology

For citation: Antashchuk K. M., Atakov A. I., Kocherov A. B., Golubev S. A., Teremkov A. V. (2026). UAV-based geophysics for geological mapping, mineral exploration, and near-surface investigations. *Regional Geology and Metallogeny*, 33(2), 53–68. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_53-68

and equipment used. Case studies from multiple sites illustrate the practical application of the UAV-based geophysical system. The results demonstrate the potential of the proposed UAV-based technologies. Both international and Russian research efforts facilitate prospects for further development.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные авиационные системы (далее — БАС) используются в геологоразведочных работах для решения широкого круга задач: аэрофотосъемка или лидарная съемка для создания детальных моделей современного рельефа, рекогносцировочные работы, мониторинговые наблюдения (Brighenti et al., 2021; Gailler et al., 2021; Hao et al., 2023; Niedzielski, 2018). Беспилотные технологии позволяют сократить время и затраты на проведение исследований, повысить безопасность проведения работ в труднодоступных районах, а также обеспечить высокую точность, детальность и периодичность измерений.

Применение беспилотных носителей для проведения геофизической съемки наиболее востребовано для методов, не требующих непосредственного контакта с земной поверхностью: магниторазведка, гамма-спектрометрия и индукционные методы электроразведки. В последние десятилетия технология беспилотной магнитометрии прочно вошла как в мировую, так и в отечественную практику геологоразведочных работ (Zheng et al., 2021). Способность современных летательных аппаратов детально огибать рельеф на предельно малых высотах обеспечивает высокое качество беспилотных магнитных съемок и преимущество перед наземными измерениями, так как позволяет избавляться от шумов, связанных с техногенным загрязнением участка работ, мелкими приповерхностными объектами различной природы и погрешностями позиционирования наземного оборудования в условиях густого лесного покрова.

Проведение беспилотных гамма-спектрометрических съемок ограничено техническими возможностями широко доступных БАС со взлетной массой до 30 кг, так как для выполнения кондиционных измерений спектра гамма-поля необходимы детекторы с объемом не менее 2 л (массой более 15 кг), что требует использования более тяжелых носителей.

Беспилотные электроразведочные технологии в настоящее время активно развиваются по нескольким направлениям: адаптация метода переходных процессов (далее — МПП) с использованием совмещенной установки или с наземным источником (Тригубович и др., 2024; Pirttijärvi et al., 2022¹; Xing et al., 2024) и частотного электромагнитного (далее — ЭМ) зондирования с контролируемым наземным источником (Антащук и др., 2023). Выбору конкретной системы должны предшествовать, во-первых, математическое моделирование, позволяющее оценить величину аномального отклика от модели поискового объекта, и, во-вторых, оценка возможности реализации того или иного метода на заданной территории с учетом ландшафтных факторов

и возможностей проведения работ с использованием доступных беспилотных носителей.

При разработке и внедрении беспилотных технологий авторы статьи ориентировались на возможность их применения для решения широкого круга геологических задач. В беспилотной магниторазведке при использовании квантовых датчиков с низким уровнем собственных шумов и высокой частотой дискретизации обеспечивается высокая разрешающая способность и точность съемки вне зависимости от особенностей решаемых геолого-геофизических задач. В беспилотных модификациях электроразведочных методов необходимо искать компромисс между глубиной, производительностью и детальностью съемки. В беспилотной модификации МПП с источником на земле и тем более с совмещенной установкой, даже с маломощным генератором, масса буксируемого оборудования составляет более 7 кг, что значительно снижает автономность БАС и, как следствие, производительность работ. В применяемой авторами технологии беспилотных частотных зондирований (далее — ЧЗ), с одной стороны, разработан достаточно легкий вариант буксируемого оборудования, а с другой стороны, обеспечена возможность адаптации параметров съемки для изучения широкого интервала глубин за счет изменения используемого частотного диапазона сигнала.

Технология геофизических съемок с использованием БАС апробирована при решении структурно-картировочных, поисковых и инженерных задач. При проведении исследований использовалось магниторазведочное оборудование компании ГК «Геоскан», технология и оборудование, применяемые авторами для беспилотных электроразведочных работ, которые представлены в публикациях Антащук и др. (2023, 2024) и кратко описаны ниже.

ТЕХНОЛОГИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЧАСТОТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Разработанная коллективом авторов технология основана на методе частотного зондирования с заземленным горизонтальным электрическим диполем (далее — ГЭД). Источник ЭМ поля создает прямоугольный сигнал с паузой (меандр) с базовой частотой, которая выбирается в зависимости от необходимой глубины исследования. Буксируемым на беспилотном носителе оборудованием проводится регистрация трех магнитных компонент

¹ Pirttijärvi M., Saartenoja A., Korkeakangas P. Drone-based electromagnetic survey system for geophysical applications // Open Research Europe. 2022. Vol. 2. P. 3. (препринт)

ЭМ поля (H_x , H_y , H_z) в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц, а также положения и ориентации измерительной платформы в пространстве. Одновременно на земле регистрируется ток в источнике поля. Измерения выполняются в промежуточной и дальней зонах ГЭД. Размер планшета съемки зависит от силы тока в источнике, его размеров и удельного сопротивления среды.

Технология беспилотных ЭМ зондирований разработана для изучения распределения удельного сопротивления пород в диапазоне глубин от 5–10 до 500 м. Разрешающая способность съемки по латерали определяется скоростью носителя, поскольку запись ведется непрерывно с высокой частотой дискретизации; методика измерений может быть адаптирована под необходимое горизонтальное разрешение от первых метров.



Рис. 1. Внешний вид регистратора «МЭМИ» (a) и полет по рабочему маршруту с регистратором на подвесе (b)

Fig. 1. MEMI recorder (a) and survey-line flight with the recorder installed in a towed bird (b)

Разрешающая способность метода по глубине ограничена количеством регистрируемых частот — нечетными гармониками базовой частоты первичного поля источника. Как и для всех электроразведочных методов, разрешающая способность падает с глубиной, для малых глубин она составляет первые метры, на больших глубинах разрешающая способность оценивается в десятки метров. Приведенные оценки являются весьма условными, так как разрешающая способность зависит не только от измеряемого сигнала, но и от характеристик изучаемых структур.

Разработанное регистрирующее оборудование (программно-аппаратурный комплекс «МЭМИ», рис. 1) включает буксируемую гондолу с тремя индукционными магнитными датчиками, регистратор, GPS-антенну и инерциальную навигационную систему. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя АЦП регистратора — 312 кГц, частотный диапазон оборудования — от 10 Гц до 100 кГц. Общий вес регистрирующего оборудования вместе с блоком аккумуляторов составляет 2,5 кг.

В качестве носителя может быть использована БАС с массой полезной нагрузки от 2,5 кг. В настоящее время на рынке представлены различные типы беспилотных аппаратов, отвечающих данным требованиям, в том числе электрические и гибридные коптеры, беспилотные вертолеты. Поскольку при проведении измерений БАС являются дополнительным источником ЭМ помех, длина трос-кабеля составляет не менее 25 м.

В качестве источника ЭМ используются геофизические генераторы, позволяющие подавать меандр в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц. При съемке небольших участков можно использовать малогабаритные генераторы мощностью в первые кВт. При исследовании больших площадей (десятки км² и более) применяются мощные источники (более 30 кВт). Размер рабочего планшета в таком случае составляет 10–20 км² от одной расстановки питающего диполя. Форма рабочего планшета определяется особенностями ЭМ поля ГЭД. Съемка проводится в экваториальной части диполя, в промежуточной и дальней зонах.

Обработка зарегистрированных временных рядов трех магнитных компонент данных включает в себя следующие операции. В начале осуществляется расчет автоспектров измеренных магнитных компонент ЭМ поля с учетом углов, характеризующих положение измерительной платформы в пространстве, и частотных характеристик оборудования. Затем проводится расчет амплитуды и фазы трех магнитных компонент ЭМ поля на базовой частоте источника и ее нечетных гармониках, и осуществляется их нормировка на ток источника. Дополнительно по полученным данным проводится расчет инвариантного параметра T_{inv} , представляющего собой отношение модуля вертикальной компоненты к квадратному корню из суммы квадратов модулей горизонтальных компонент:

$$T_{inv} = \frac{H_z}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}$$

На рис. 2, *a* показаны результаты обработки (фильтрации, учета углов вращения системы, применения калибровочных характеристик) интервала записи длительностью 20 с, полученной в 2 км от источника. На приведенном примере выделяются базовая частота 80 Гц и нечетные гармоники — 240,

400, 560, 720 Гц и т. д. На рис. 2, *b* представлены функции отклика среды для этой точки записи — амплитуды компонент магнитной индукции, нормированные на величину тока в источнике. Результат решения 1D обратной задачи — распределение удельного сопротивления с глубиной — показан на рис. 2, *c*.

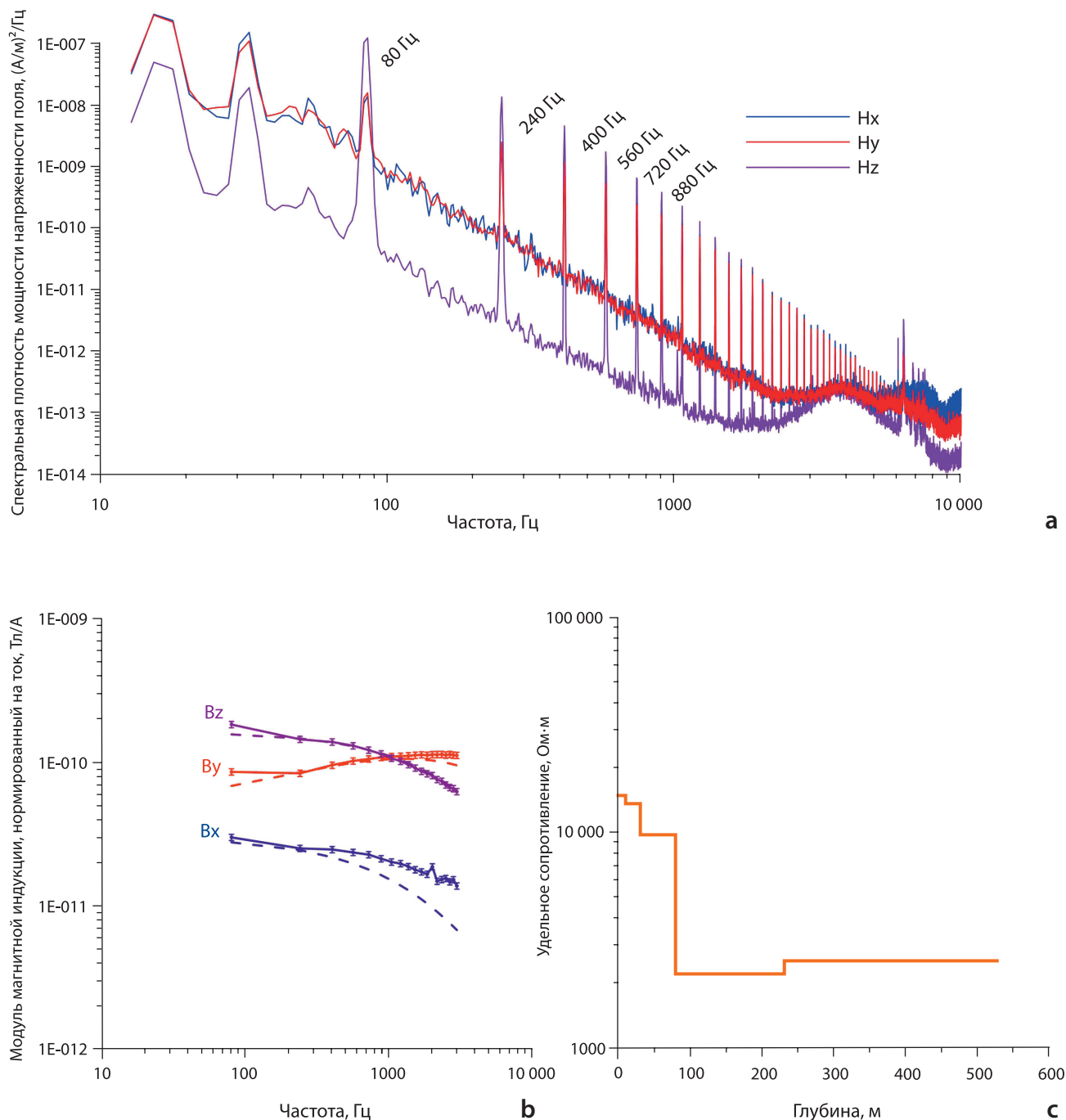


Рис. 2. Обработка зарегистрированных временных рядов магнитных компонент

a — пример расчета автоспектров трех магнитных компонент (H_x , H_y , H_z) для окна 20 с. Базовая частота — 80 Гц; *b* — кривые амплитуды компонент магнитной индукции, нормированные на величину тока в источнике: сплошные линии — измеренные, пунктирные — рассчитанные; *c* — модель распределения удельного сопротивления по результатам 1D инверсии

Fig. 2. Magnetic component time series processing

a — calculation example of three magnetic component (H_x , H_y , H_z) autospectra for a 20-second gate. The base frequency is 80 Hz; *b* — the amplitude curves of the magnetic induction components, normalized to the current in the source: solid lines — measured ones, dashed lines — calculated ones; *c* — resistivity distribution model based on 1D inversion results

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Как уже отмечалось выше, геофизические съемки с использованием БАС могут применяться для решения широкого круга задач. Возможность изменения скорости и высоты полета, детальности огибания рельефа позволяет адаптировать параметры регистрации и обеспечивать необходимую разрешающую способность съемки.

Решение картировочных задач

На картировочной стадии основными геологическими задачами являются: картирование областей распространения контрастных по петрофизическим свойствам стратифицированных образований, определение характера залегания стратифицированных осадочных, вулканогенных и вулканогенно-осадочных толщ, картирование интрузивных массивов и тектонических нарушений, а также выделение по комплексу геолого-геофизических признаков участков, перспективных для обнаружения полезных ископаемых.

Проведение беспилотных геофизических съемок для решения картировочных задач предполагает исследование относительно больших площадей (порядка нескольких сотен км²) с достаточно большой глубиной электроразведочных исследований (до 500 м). Для обеспечения необходимой плотности измерений скорость по маршруту составляет порядка 10–15 м/с, необходимая глубинность достигается за счет использования низких частот первичного ЭМ поля (базовая частота тока в источнике выбирается в диапазоне от 1 до 100 Гц).

По результатам беспилотных геофизических съемок, выполненных на территории Магаданской области для решения структурно-картировочных задач, получены новые данные о строении территории, позволившие значительно уточнить особенности геологического строения площади исследования и оценить ее перспективы для обнаружения полиметаллического оруденения.

Исследуемая территория расположена в пределах Таскано-Омулёвской зоны, сложенной палеозойскими толщами Омулёвского террейна, и представляет собой сложное складчато-надвиговое сооружение. Предшественниками¹ отмечены перспективы обнаружения здесь стратиформного флюорит-свинцово-цинкового и скарнового серебро-полиметаллического оруденения. Выделяют несколько основных факторов, контролирующих полиметаллическое оруденение Таскано-Омулёвской зоны. Наличие известняково-доломитовых толщ благоприятно в отношении стратиформного флюорит-свинцово-цинкового оруденения. Карбонатно-глинистые толщи, перекрывающие рудоносные известняково-доломитовые отложения, служат структурно-литологическими экранами для локализации руд этого типа. Локальные позднеюрские вулканоструктуры являются рудоматеринскими для скарнового и жильного серебро-свинцово-цинкового оруденения. Контрастный разрез палеозойских отложений с множественными

контактами карбонатных и алюмосиликатных пород, вмещающий мезозойские гранитоиды и вулканоструктуры, является благоприятной обстановкой для формирования скарновых залежей.

Несмотря на большое количество исследований, в геологическом строении территории оставался ряд нерешенных вопросов, касающихся строения надвиговых толщ, определения кинематики разрывных нарушений, уточнения преимущественного состава пород с выделением карбонатно-глинистых и карбонатно-доломитистых толщ. Кроме того, практический интерес представляют расположенные на небольших глубинах вулканоструктуры и связанные с ними разрывные нарушения различных порядков, которые потенциально могли служить каналами для миграции рудоносных флюидов. Для решения этих задач в 2022 г. на территории 100 км² была выполнена беспилотная геофизическая съемка методами магнито-разведки и ЭМ зондирования.

Участок работ (рис. 3, а) сложен карбонатными породами ордовикского, силурийского и девонского возраста, среди которых в том числе выделяются глинистые разности, и терригенными и терригенно-карбонатными отложениями карбона. На участке распространены субвулканические образования юрского возраста. По имеющимся представлениям¹, на изучаемой территории развита система надвигов северо-западного простираения с западной вергентностью, сформировавшаяся в постмагматический этап.

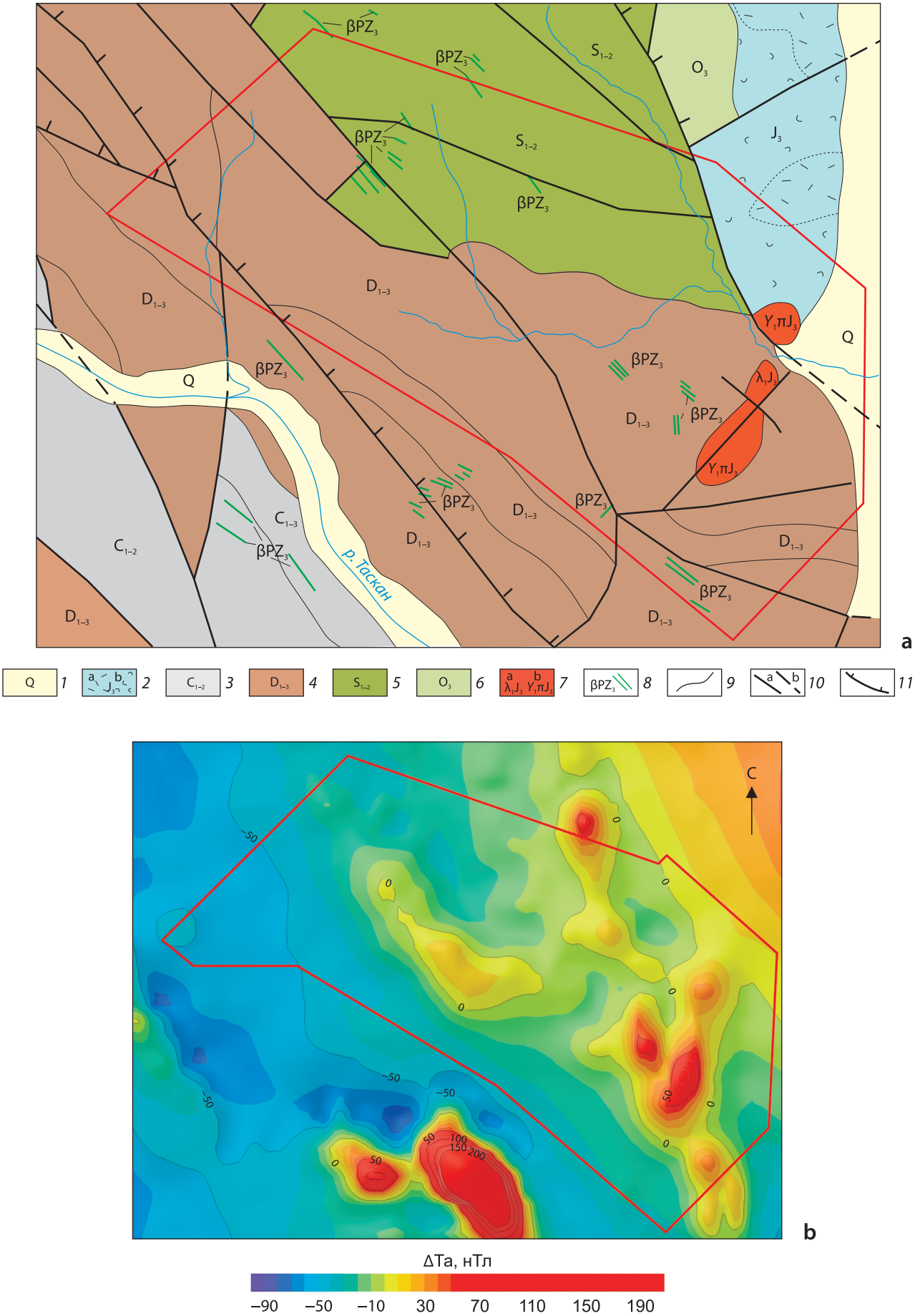
По результатам предшествующих аэрогеофизических работ масштаба 1 : 50 000, выполненных в 2020 г. с использованием вертолета Ми-8², в центральной части участка выделяется контрастная область повышенных значений магнитного поля. По геологическим данным, аномалия сосредоточена в области развития карбонатных пород девонского возраста, что не может объяснить ее природу.

По результатам беспилотных исследований (рис. 4, а) крупные изометричные магнитные аномалии, выделенные по данным аэромагнитной съемки, разделяются на более узкие линейные зоны шириной около 200–300 м преимущественно северо-западного простираения (индекс МЛ-1) и линейные аномальные зоны субмеридионального простираения (индекс МЛ-2), секущие северо-восточные зоны и характеризующиеся большей амплитудой.

Кроме того, в центральной и южной частях участка выделяется несколько изометричных аномалий, связанных с субвулканическими образованиями (рис. 4, а — М1, М2 и М3). Аномалии М2 и М3 отвечают закартированному по материалам геологической съемки субвулканическому телу кислого состава (рис. 3, а); аномалия М1 имеет схожую амплитуду

¹ Шпикерман В. И., Омиров О. Н., Мальков Б. И., Старцев К. Н. Отчет о групповой геологической съемке масштаба 1 : 50 000 и поисках коренных месторождений золота, серебра и других полезных ископаемых за 1977–1981 гг. (Верхне-Тасканский отряд) : листы Р-55-12-В (в, г), Г (в, г), Р-55-24-А, Б, Г (а, б), Р-56-13-А, Б, В (а, б), Г (а, б); Р-56-14-А. Ягодное, 1981.

² Алексеев Д. И. Отчет о результатах работ по объекту «Проведение в 2019–2021 годах региональных геолого-съемочных работ масштаба 1 : 200 000 на группу листов в пределах Дальневосточного ФО (Северо-Восточные районы)» // ФГБУ «ВСЕГЕИ». СПб., 2021.



и морфологию, но, по данным предшественников, находится в зоне распространения карбонатных пород.

По результатам электроразведочной съемки методом беспилотного ЧЗ получена модель распределения удельного сопротивления до глубины 500 м. На рис. 4, *b* приведены геоэлектрические разрезы по трем профилям. Дополнительно в модуле GM-SYS программы Oasis Montaj Geosoft было проведено 2D-моделирование магнитной восприимчивости. Среда была разбита на блоки, для которых в интерактивном режиме подбирались значения магнитной восприимчивости, положение и форма границ таким образом, чтобы достичь минимальной невязки между измеренными и рассчитанными от построенной модели значениями аномального магнитного поля. Подобранные значения магнитной восприимчивости указаны цифрами на геоэлектрических разрезах, границы блоков отвечают границам литологических разностей.

В юго-западных частях приведенных разрезов картируется высокоомный (удельное сопротивление более 2000 Ом·м) слабомагнитный слой, падающий в юго-западном направлении и отвечающий карбонатным породам девона. В северо-восточных частях, напротив, выделяется проводящая область (удельные сопротивления — сотни Ом·м), связанная с надвинутыми глинистыми карбонатными толщами силура. В то же время здесь наблюдается повышение значений магнитной восприимчивости горных пород (до $400\text{--}500 \times 10^{-5}$ ед. СИ), что соответствует линейным аномалиям МЛ-1 и МЛ-2.

На профиле ЕЗ известное субвулканическое тело картируется субвертикальной областью повышенных значений удельного сопротивления

(более 1500 Ом·м) и магнитной восприимчивости (450×10^{-5} ед. СИ) и совпадает с изометричной аномалией магнитного поля М-2. В контактовой зоне наблюдается понижение значений удельного сопротивления до 1000 Ом·м, а значения магнитной восприимчивости достигают 800×10^{-5} ед. СИ. Высокоомный слой в верхней части разреза, отвечающий неизменным карбонатным породам девона, характеризуется низкими значениями магнитной восприимчивости.

На геоэлектрических разрезах по профилям Е1 и Е2 области высоких значений удельного сопротивления (более 1500 Ом·м) в центральной части профилей, характеризующиеся повышенными значениями магнитной восприимчивости ($500\text{--}700 \times 10^{-5}$ ед. СИ), залегают на глубине более 200 м от поверхности. Изометричная аномалия магнитного поля М-1 приурочена к зоне контакта области высоких и пониженных значений удельного сопротивления. Высокоомные области интерпретируются нами как субвулканические образования, не выходящие на дневную поверхность. Их кровля имеет сложную морфологию, которая сформировалась в результате смещений по разрывным нарушениям и надвигам на постмагматическом этапе. Понижение удельного сопротивления и повышение магнитной восприимчивости в зоне контакта может быть связано с тектонической переработкой и развитием магнитных минералов под воздействием флюидов.

На приведенных моделях штриховкой показаны предполагаемые по геофизическим данным области развития метасоматических процессов. Эти области могут рассматриваться как наиболее перспективные с точки зрения локализации полиметаллического оруденения.

Рис. 3. Схема геологического строения участка работ (а) и карта аномального магнитного поля по результатам аэрогеофизической съемки масштаба 1 : 50 000 (b)

1 — четвертичная система. Галечники, пески, суглинки; **2** — юрская система (J_3): *a* — лавы, *b* — туфы; **3** — каменноугольная система (C_{1-2}). Карбонатные и терригенно-карбонатные породы; **4** — девонская система (D_{1-3}). Карбонатные, терригенно-карбонатные и терригенные породы; **5** — силурийская система (S_{1-2}). Терригенные и терригенно-карбонатные породы; **6** — ордовикская система (O_3). Терригенно-карбонатные и терригенные породы; **7** — позднеюрский интрузивный комплекс: *a* — липариты, *b* — гранит-порфиры; **8** — позднепалеозойский долеритовый комплекс; **9** — границы между разновозрастными образованиями; **10** — тектонические границы: *a* — достоверные, *b* — предполагаемые; **11** — тектонические границы с указанием направления падения поверхности сместителя. Красный контур — границы участка беспилотных съемок

Источник: по Шпикерману (1981)*

Fig. 3. Geological structure of the study area (a) and the total magnetic intensity map after the airborne geophysical survey, scale of 1 : 50,000 (b)

1 — Quaternary system. Shingle, sand, loam; **2** — Jurassic system (J_3): *a* — lavas, *b* — tuffs; **3** — Carboniferous system (C_{1-2}). Carbonate and terrigenous-carbonate rocks; **4** — Devonian system (D_{1-3}). Carbonate, terrigenous-carbonate and terrigenous rocks; **5** — Silurian system (S_{1-2}). Terrigenous and terrigenous-carbonate rocks; **6** — Ordovician system (O_3). Terrigenous-carbonate and terrigenous rocks; **7** — Late Jurassic intrusive complex: *a* — liparite, *b* — granite porphyry; **8** — Late Paleozoic dolerite complex; **9** — boundaries between diachronous formations; **10** — tectonic boundaries: *a* — established, *b* — inferred; **11** — tectonic boundaries, with the fault plane dip direction indicated. The red outline refers to the survey area boundaries

Source: from Shpikerman (1981)**

* Шпикерман В. И., Омиров О. Н., Мальков Б. И., Старцев К. Н. Отчет о групповой геологической съемке масштаба 1 : 50 000 и поисках коренных месторождений золота, серебра и других полезных ископаемых за 1977–1981 гг. (Верхне-Тасканский отряд) : листы Р-55-12-В (в, г), Г (в, г), Р-55-24-А, Б, Г (а, б), Р-56-13-А, Б, В (а, б), Г (а, б); Р-56-14-А. Ягодное, 1981.

** Shpikerman V. I., Omirov O. N., Malkov B. I., Startsev K. N. (1981). *Report on the group geological survey, scale of 1 : 50,000, and prospecting for native deposits of gold, silver, and other minerals for 1977–1981 (Upper Taskan crew): Sheets P-55-12-B (v, z), Г (v, z), P-55-24-A, Б, Г (a, б), P-56-13-A, Б, В (a, б), Г (a, б); P-56-14-A. Yagodnoe.*

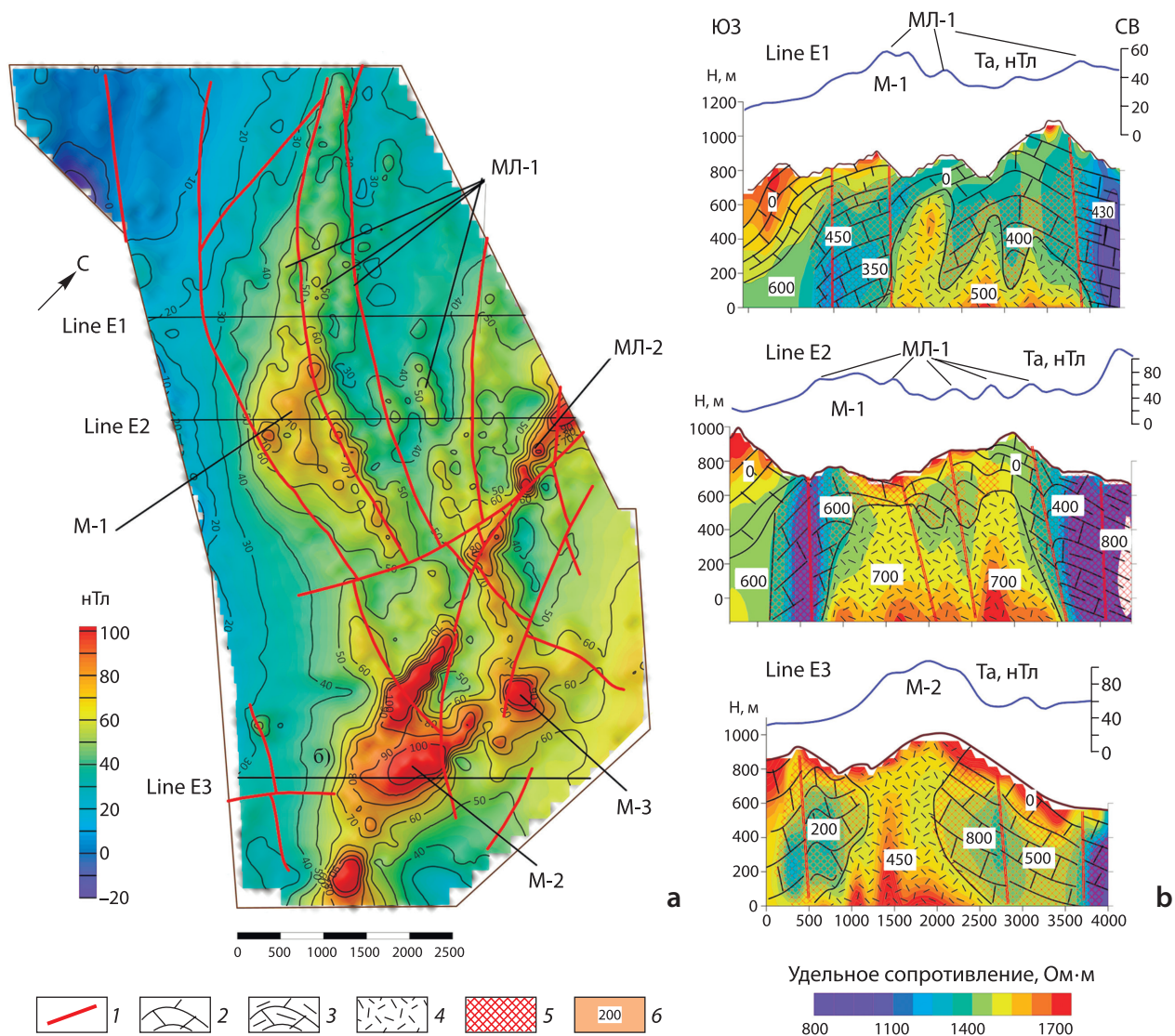


Рис. 4. Карта аномального магнитного поля по результатам беспилотной съемки масштаба 1 : 10 000 (а) и геоэлектрические разрезы по маршрутам Line E1, Line E2 и Line E3 (б)

1 — разрывные нарушения по данным геологического картирования; 2 — карбонатные породы; 3 — глинистые карбонатные породы; 4 — вулканогенные породы; 5 — предполагаемые зоны сульфидной минерализации; 6 — значения магнитной восприимчивости (10^{-5} ед. СИ)

Fig. 4. Total magnetic intensity map after UAV-based survey, scale of 1 : 10,000 (a) and geoelectric sections along Line E1, Line E2, and Line E3 (b)

1 — faults according to geological mapping data; 2 — carbonate rocks; 3 — clay-carbonate rocks; 4 — volcanic rocks; 5 — inferred zones of sulfide mineralization; 6 — magnetic susceptibility values (10^{-5} SI units)

Поисковые задачи

На поисковом этапе основной геологической задачей является локализация перспективных структур и образований рудоконтролирующих и рудовмещающих разломов, интрузивных массивов, зон приконтактных изменений для последующей заверки наземными геофизическими методами. В связи с этим необходимо обеспечить достаточно высокое разрешение, что ограничивает скорость съемки до 3–5 м/с и высоту при обгоне рельефа. Для обеспечения детального изучения геоэлектрического разреза до глубин 200–300 м при проведении электроразведочных измерений базовая частота выбирается по результатам предварительного математического моделирования

и опытно-методических работ и, как правило, находится в диапазоне 100–500 Гц. Работы с использованием базовой частоты в этом диапазоне, с одной стороны, позволяют получить геоэлектрический разрез до глубины несколько сотен метров, а, с другой стороны, обеспечивают достаточное для решения геологических задач разрешение по глубине.

В качестве примера решения поисковых задач рассмотрим результаты съемки, полученные на золоторудном объекте штокверкового типа. Узкие рудные зоны, выделенные по результатам литогеохимической съемки, приурочены к контакту штокверка гранодиоритов и гранодиорит-порфиров и вмещающих вулканогенно-осадочных пород (рис. 5).

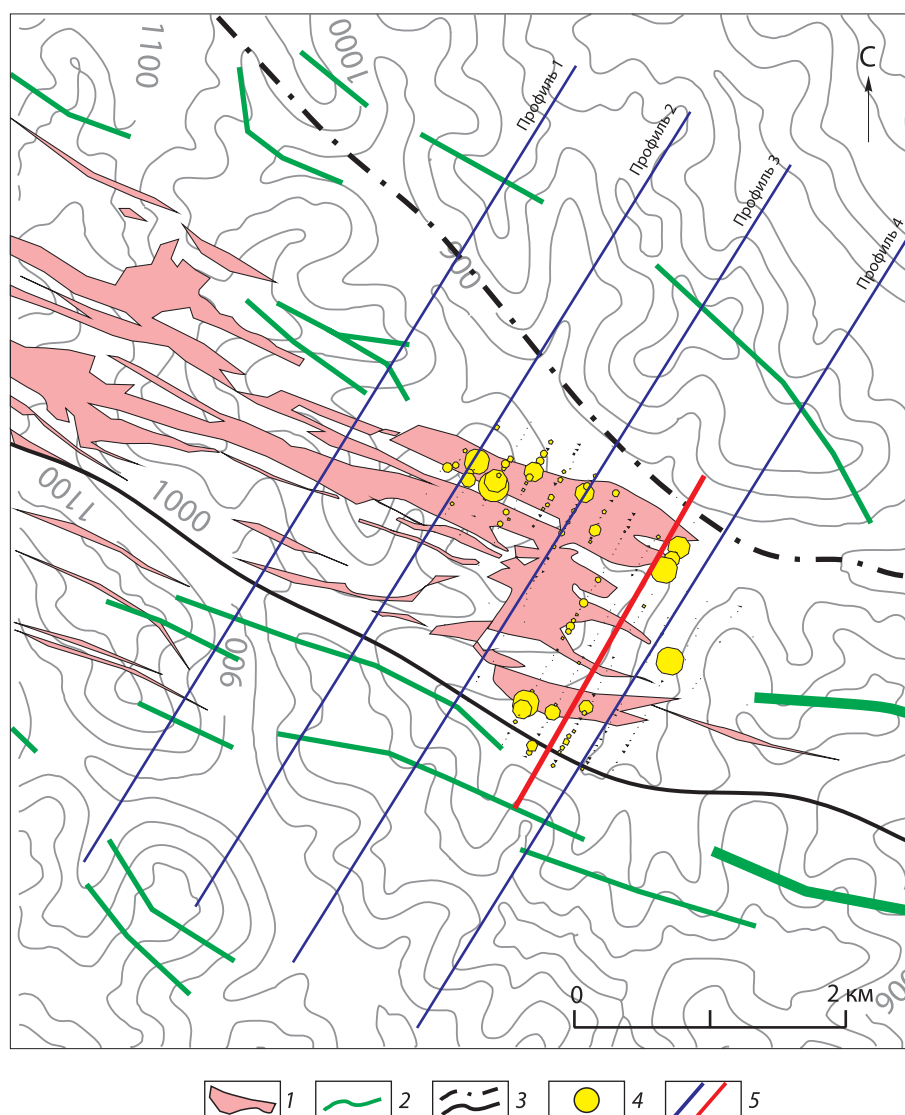


Рис. 5. Упрощенная схема геологического строения участка работ

1 — штокверк гранодиоритов; 2 — дайки основного состава; 3 — тектонические нарушения (предполагаемые по данным предшествующих работ и установленные); 4 — содержание золота по результатам геохимического опробования (размер символов пропорционален содержанию); 5 — линии интерпретационных геофизических маршрутов (синие — беспилотных частотных зондирований, красные — электротомографии вызванной поляризации)

Fig. 5. Simplified geological structure of the study area

1 — granodiorite stockwork; 2 — mafic dykes; 3 — tectonic faults (inferred from previous studies and established); 4 — gold content based on geochemical sampling results (the symbol size is proportional to the content); 5 — geophysical interpretation lines (the blue ones refer to the UAV-based controlled source electromagnetic method, red — electrical resistivity tomography)

Участок работ характеризуется сложными физико-географическими условиями, горным рельефом с перепадами высот по маршруту до 900 м и наличием многолетнемерзлых пород. Съемка выполнялась на скорости 3–5 м/с на минимальной высоте над рельефом 30–50 м с расстоянием между маршрутами электроразведочной съемки 200 м, магниторазведочной — 100 м.

На рис. 6 показаны геоэлектрические разрезы по нескольким профилям (положение см. на рис. 5). Проводящие разности пород в юго-западной части участка отвечают осадочным вмещающим породам. В северо-восточной части участка выше по разрезу залегают более высокоомные осадочные отложения.

В центральной части участка (разрезы 2, 3) более высокоомное субвертикальное образование связано с наличием подводящего рудоносного штокверка. По данным геохимической съемки, эта область пространственно совпадает с повышенными концентрациями золота и выделена как наиболее перспективная для обнаружения рудной минерализации. Область ограничена с северо-западной части, где отсутствует подобный объект и не наблюдается геохимических аномалий (разрез 1).

Исследуемый участок характеризуется недифференцированным малоамплитудным магнитным полем со значениями локальных аномалий не более ± 20 нТл. Геохимическая аномалия пространственно

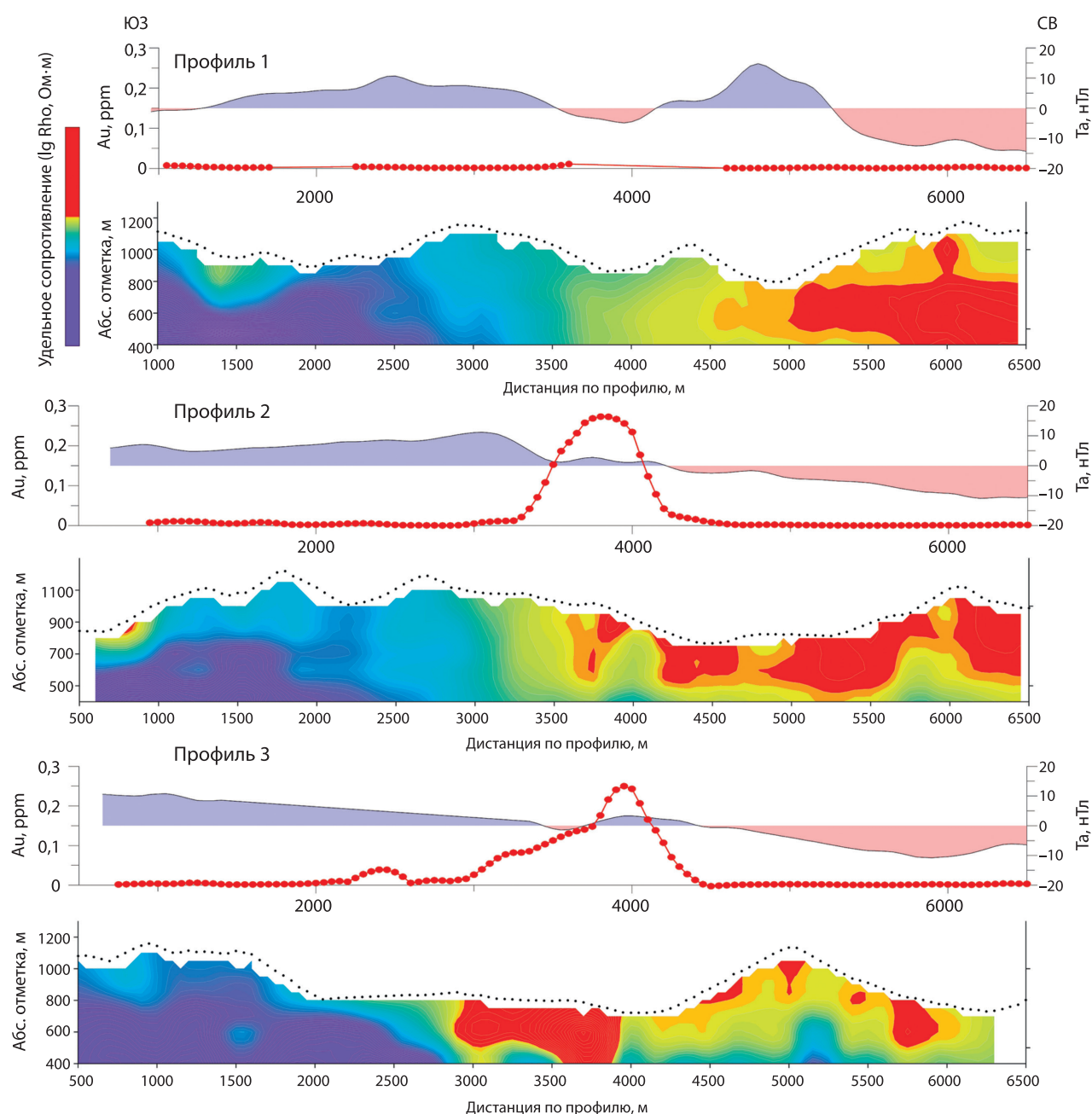


Рис. 6. Геоэлектрические разрезы по трем маршрутам (положение показано на рис. 5), совмещенные с графиками аномального магнитного поля и содержания золота по результатам геохимического опробования

Fig. 6. Goelectric sections along three lines (fig. 5 displays the position) aligned with the total magnetic intensity map lines and gold content plots after geochemical sampling

приурочена к малоамплитудному (менее 5 нТл) локальному максимуму.

Дальнейшие работы были сосредоточены на перспективном участке. Проведены петрофизические измерения в 100 образцах, определялись удельное сопротивление, поляризуемость и магнитная восприимчивость (рис. 7). Для интрузивных пород (гранодиоритов и диоритов) характерны повышенные значения удельного сопротивления, слабый эффект вызванной поляризации (далее — ВП) (для зон развития сульфидной минерализации) и низкие значения магнитной восприимчивости. Для метасоматически измененных вмещающих пород (зон

окварцевания и калишпатизации) наблюдаются повышенные значения удельного сопротивления, слабый эффект ВП и наименьшие значения магнитной восприимчивости. Для вмещающих пород характерны пониженные значения удельного сопротивления. Среди них выделяются диамиктиты, для которых наблюдаются высокие значения параметра ВП (до 15 %) и повышенные значения магнитной восприимчивости.

Выделенные по данным беспилотных работ перспективные зоны, приуроченные к краевой части штоков, были заверены методом электротомографии-ВП (рис. 8). Инверсия выполнялась в классе

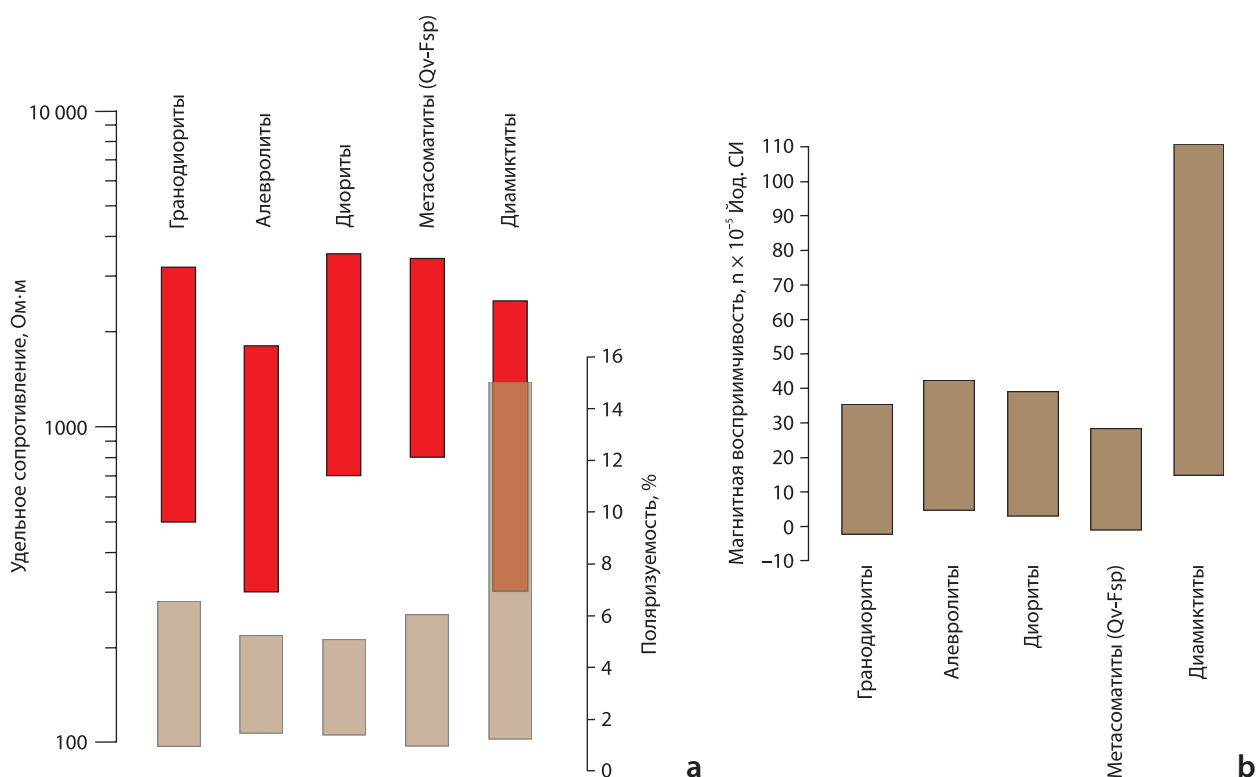


Рис. 7. Результаты определения петрофизических свойств

a — удельного сопротивления и поляризуемости; *b* — магнитной восприимчивости

Fig. 7. Petrophysical rock properties

a — resistivity and polarizability; *b* — magnetic susceptibility

двумерных моделей в программе ZondRes2D¹ (разработчик А. Е. Каминский). На геолого-геофизической модели (рис. 8, *e*), полученной по результатам комплексных исследований, выделен штокверк, характеризующийся высокими значениями удельного сопротивления, пониженной магнитной восприимчивостью и отсутствием эффекта ВП. Удельные сопротивления вмещающих пород изменяются в широких пределах, наблюдаются высокие значения параметра ВП (до 10 %) и положительные аномалии магнитного поля. Поскольку оруденение приурочено к эндо- и экзоконтакту штокверка, наибольший поисковый интерес представляет зона градиента удельного сопротивления, параметра ВП и аномального магнитного поля.

Безусловно, разрешающая способность беспилотной электроразведки уступает наземным съемкам, но позволяет более оперативно получать геоэлектрическую характеристику разреза на больших площадях. Сравнивая результаты наземных и беспилотных электроразведочных работ, можно отметить следующие особенности. На данных обоих методов в юго-западной части профиля на абсолютной отметке около 800 м картируется граница проводящих и высокоомных вмещающих толщ. Форма штокверка, выделенная по данным беспилотной электроразведки и отвечающая значениям удельного сопротивления более 5000 Ом·м, хорошо коррелирует с областью минимальных значений

параметра ВП (менее 3 %). На геоэлектрическом разрезе по данным электротомографии в рассматриваемой области, напротив, значения удельного сопротивления несколько ниже (1000–2000 Ом·м), чем для остального профиля. В интервале дистанций 1700–1800 м по области увеличения удельного сопротивления второго, более проводящего слоя, можно предположить наличие здесь более высокоомных пород, отвечающих корневым частям штокверка. Подобные расхождения могут быть связаны с крайне высокими удельными сопротивлениями пород, что искажает данные электротомографии на постоянном токе, а для метода ЧЗ, напротив, являются благоприятным фактором. Полученная геолого-геофизическая модель и выделенная граница штокверка в юго-западной части профиля была впоследствии подтверждена бурением.

Малоглубинные задачи

Особенностью инженерно-геофизических работ является необходимость высокого разрешения верхней части разреза. Высокоточная магниторазведка успешно используется для решения задач археологии и картирования различных погребенных локальных объектов (De Smet et al., 2021; Mu et al.,

¹ Пакет программ ZOND. URL: <https://zond-geo.com/> (дата обращения: 02.03.2026).

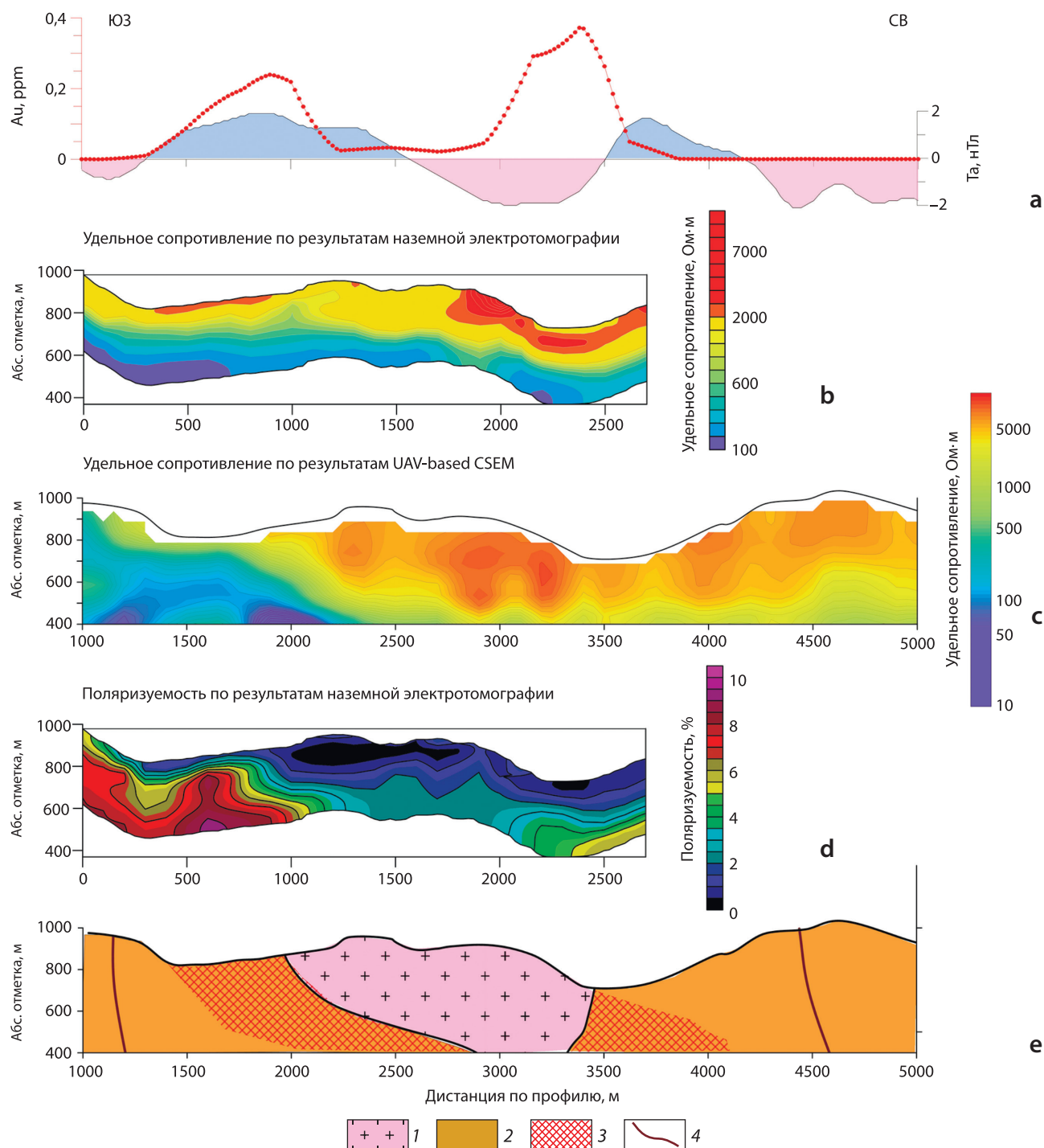


Рис. 8. Результаты комплекса геофизических исследований по интерпретационному профилю 4

a — аномальное магнитное поле и содержание золота; **b** — геоэлектрический разрез по результатам электротомографии; **c** — геоэлектрический разрез по результатам беспилотных частотных зондирований (UVA-based CSEM); **d** — разрез параметра вызванной поляризации по результатам электротомографии; **e** — геолого-геофизический разрез: 1 — интрузивные породы кислого и среднего состава: повышенные значения удельного сопротивления, слабомагнитные и немагнитные; 2 — вмещающие осадочные и вулканогенно-осадочные породы: пониженные и средние значения удельного сопротивления, слабомагнитные и немагнитные; 3 — область приконтактных изменений: пониженные значения удельного сопротивления, высокие значения поляризуемости, магнитные; 4 — тектонические нарушения, выделенные по смещениям на геоэлектрических разрезах и линейным локальным аномалиям магнитного поля

Fig. 8. Integrated geophysical survey results along interpretation line 4

a — total magnetic intensity and gold content; **b** — geoelectric section from electrical resistivity tomography inversion results; **c** — geoelectric section from UAV-based controlled source electromagnetic method (CSEM); **d** — induced polarization section from electrical resistivity tomography; **e** — integrated geological interpretation of geophysical data: 1 — felsic to intermediate intrusive rocks: elevated electrical resistivity, weakly magnetic to non-magnetic; 2 — host sedimentary and volcanic-sedimentary rocks: low to moderate resistivity, weakly magnetic to non-magnetic; 3 — contact-metasomatic alteration zone: reduced resistivity, high chargeability, highly magnetic; 4 — tectonic faults delineated from offsets on the geoelectrical sections and from linear local magnetic anomalies

2020; Schmidt et al., 2020). При использовании беспилотных ЭМ зондирований необходимо применение высоких частот (500 Гц и более) и низкой скорости съемки, что позволит изучить геоэлектрический разрез в интервале глубин от 5–10 до 50–100 м. Разрешающая способность по глубине для контрастных по электрическим свойствам объектов составляет порядка 5–10 м.

При инженерно-геологических изысканиях беспилотные ЭМ зондирования наиболее эффективно могут быть использованы для картирования осадочных толщ до глубин 50–100 м; выделения локальных объектов (например, зон распространения загрязнения, крупных таликовых зон), контрастных по удельному сопротивлению; определения мощности палеодолин; разделения блоков пород, различных по степени трещиноватости, и других малоглубинных задач.

Авторами были выполнены тестовые измерения на полигоне Александровка (Калужская область, учебная база геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и компании ООО «Северо-Запад»), целью

которых было сопоставление результатов беспилотных ЭМ зондирований с результатами электро-томографических работ, а также оценка возможностей применяемой технологии при картировании маломощных песчаных отложений в верхней части разреза.

В восточной части участка в верхней части разреза в слое суглинков залегает линза песков, выклинивающаяся в западном направлении. На рис. 9 показано положение тестового профиля, питающего диполя и изолинии глубины залегания подошвы песков, установленные по данным предшествующих работ и бурения.

Измерения ЭМ поля выполнялись при скорости съемки 7 м/с. Базовая частота ЭМ поля источника — 500 Гц. На рис. 10 показаны геоэлектрические разрез по результатам инверсии данных беспилотных ЭМ зондирований, 2D инверсии электро-томографии и геологический разрез, построенный по результатам обобщения всех имеющихся материалов. Геоэлектрический разрез по результатам инверсии ЭМ поля был получен без учета априорной информации.

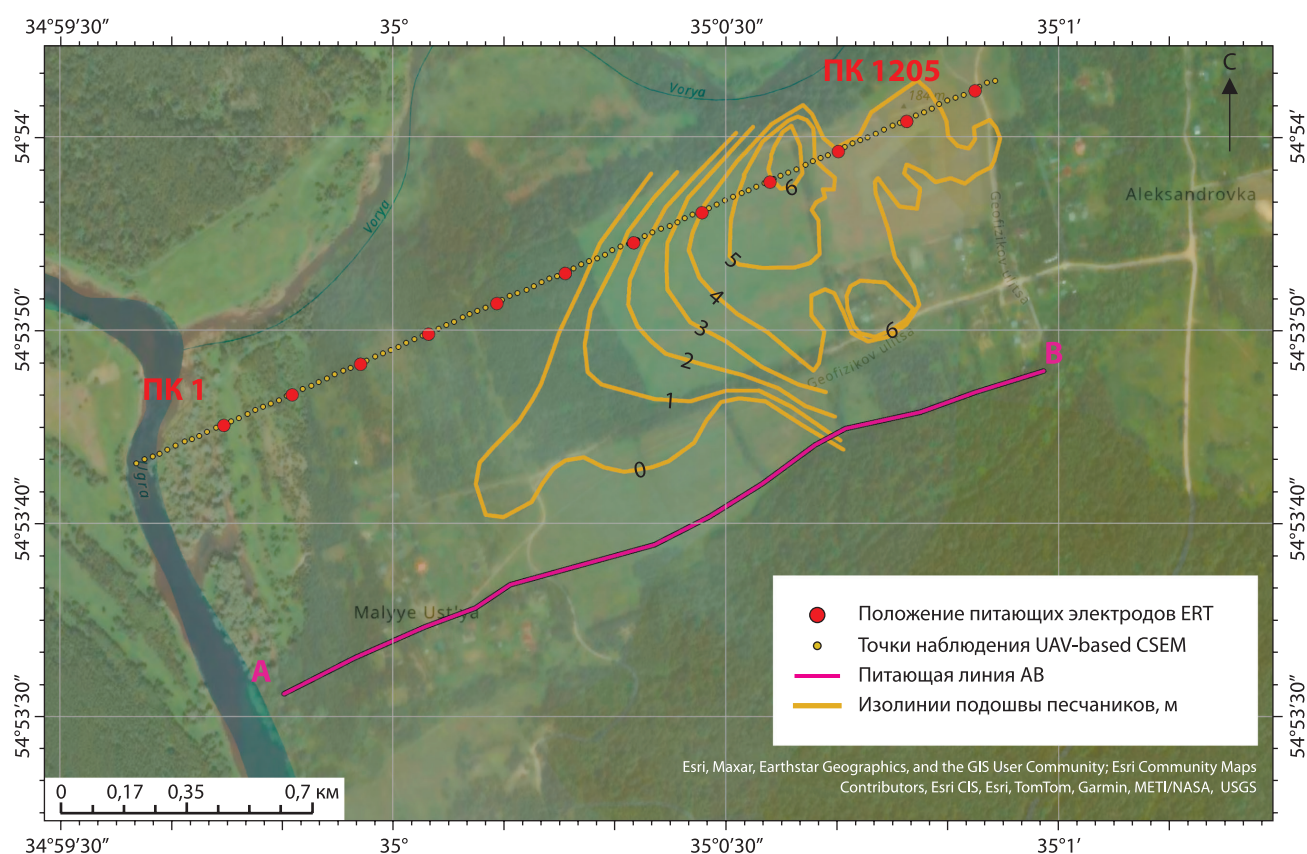


Рис. 9. Участок работ в районе Александровской базы учебных геофизических практик Геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Калужская область)

Источник: Esri, Maxar, Earthstar Geophysics, and the GIS User Community; Esri Community Maps Contributors, Esri CIS, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS

Fig. 9. Study area near the Aleksandrovka field base of geophysical practical training, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University (Kaluga Region)

Source: Esri, Maxar, Earthstar Geophysics, and the GIS User Community; Esri Community Maps Contributors, Esri CIS, Esri, TomTom, Garmin, METI/NASA, USGS

В северо-восточной части в интервале 600–1300 м в верхней части разреза залегает слой песков. На геоэлектрических разрезах этот слой соответствует высокоомным отложениям в верхней части разреза (П1), мощность которых увеличивается в северо-восточном направлении. В интервале пикетов 900–1300 м наблюдается достаточно хорошая корреляция геоэлектрических разрезов, полученных по данным томографии и беспилотной электроразведки. В интервале 1100–1300 м ниже высокоомного слоя картируются проводящие породы, а в интервале 900–1100 м — более высокоомные.

Следует отметить, что данные всех используемых электроразведочных методов значительно превышают мощность песчаных отложений верхней части разреза относительно результатов, полученных по данным бурения. Это может быть связано с анизотропией геоэлектрических свойств нижележащих суглинков и супесей.

Наибольшее расхождение в сравниваемых данных электроразведочных методов выявлено в интервале 650–900 м (аномальная зона А1 на рис. 10), где, по данным электротомографии, под слоем высокоомных песков картируются проводящие породы мощностью около 20 м, залегающие на высокоомном основании. На геоэлектрическом разрезе по результатам беспилотных зондирований выделяются высокоомные породы. Выявленные несоответствия, вероятно, вызваны высокой степенью анизотропии пород (суглинков, супесей), поскольку такие толщи по-разному проявляются в данных электроразведочных методов с использованием переменного высокочастотного или постоянного тока.

В юго-западной части профиля в интервале 0–600 м на геоэлектрических разрезах выделяются несколько блоков, отличающихся по характеру геоэлектрического разреза. Юго-западный блок (дистанции 0–80 м) во всем интервале изученных глубин характеризуется пониженными значениями удельного сопротивления, что может быть связано с выклиниванием толщи известняков или с повышенной трещиноватостью и обводненностью горных пород в зоне тектонического нарушения, приуроченной к руслу р. Угра. Для блоков в интервалах 80–310 м и 310–610 м, разделенных субвертикальными проводящими зонами, геоэлектрический разрез характеризуется трехслойным строением типа К. В верхней части разреза выделяется проводящий слой, представленный суглинками и глинами, ниже которого залегает высокоомный слой известняков. Кровля известняков находится на глубинах около 10 м по данным беспилотных ЭМ зондирований и на глубине 10–25 м по данным электротомографии.

Полученные результаты сопоставления с данными электротомографии показывают, что технология беспилотных ЭМ зондирований может успешно использоваться для экспресс-оценки и выделения участков развития песчаных отложений. При мощности проводящих отложений (глин, суглинков) до 10–15 м используемые параметры съемки позволили закартировать нижележащие высокоомные карбонатные породы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Беспилотные геофизические технологии за последнее десятилетие уверенно вошли в практику геологоразведочных работ на различных этапах. Магниторазведка с использованием беспилотных носителей является общепризнанной технологией проведения работ, обеспечивающей данные высокого качества и разрешения.

Опыт применения разработанной авторами технологии беспилотных электромагнитных зондирований показывает большой потенциал ее использования для решения широкого круга геологических задач на различных этапах: от регионально-картировочных до локальных поисковых. Получаемые геоэлектрические разрезы уступают по детальности данным, которые могут быть получены наземными методами, такими как метод переходных процессов и аудиоманнитотеллурического зондирования. В то же время снижение стоимости производства работ позволяет выполнять съемки с беспилотным носителем на большой территории и осуществлять наземную заверку выделенных перспективных областей с использованием технологий зондирования, в том числе с регистрацией эффекта вызванной поляризации, только на локальных участках.

Наиболее перспективными направлениями развития электроразведочной беспилотной технологии, по мнению авторов, являются применение свип-сигналов и развитие методов 3D инверсии. Использование пакетов частот позволит обеспечить высокое заполнение кривой зондирования и, таким образом, повысить разрешающую способность. Методы 3D инверсии обеспечат получение более надежного результата и более адекватных моделей в сложных геологических условиях. При этом получаемые с применением методов 1D инверсии геоэлектрические модели уже сейчас демонстрируют достаточную надежность, что подтверждается результатами наземных съемок.

Многometодные съемки, позволяющие одновременно выполнять магниторазведку и электроразведку на одном носителе, существенно повысят эффективность работ за счет снижения трудозатрат. Сокращение времени на производство работ может позволить проводить наземную заверку выделенных перспективных участков сразу после беспилотной съемки в тот же полевой сезон. Препятствием для реализации таких съемок является отсутствие на рынке беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающих достаточную грузоподъемность и продолжительность полета, которые могут позволить реализовывать съемки на достаточно больших площадях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Антащук К. М., Атаков А. И., Бурдуков Т. К., Теремов А. В., Кочеров А. Б. Технология электромагнитных зондирований с беспилотным носителем // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024 : материалы конф. М. : Геомодель Развитие, 2024. С. 57–61.

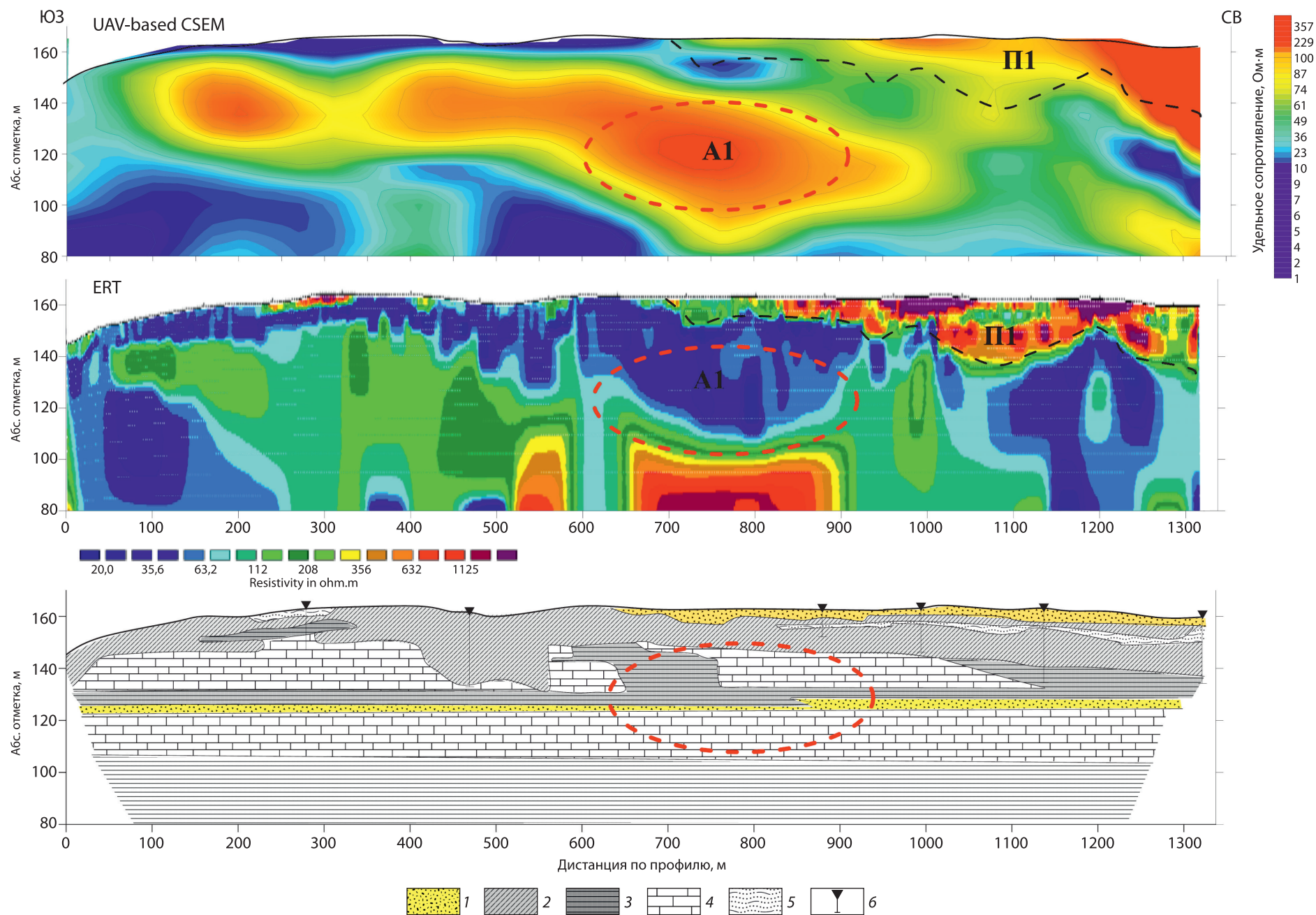


Рис. 10. Результаты беспилотных частотных зондирований (UAV-based CSEM) и электротомографии (ERT) по тестовому профилю

На геоэлектрических разрезах пунктиром отмечены области: П1 — высокоомный слой, интерпретируемый как песчаные отложения; А1 — аномальная область наибольшего расхождения данных UAV-based CSEM и ERT. На геологическом разрезе границы геологических слоев по данным бурения и предшествующих работ: 1 — пески, 2 — суглинки, 3 — глины, 4 — известняки, 5 — супеси, 6 — положение скважин

Fig. 10. Results of the UAV-based controlled source electromagnetic method (CSEM) and electrical resistivity tomography (ERT) surveys along the test line

The dashed line on the geoelectric sections indicate: П1 — high-resistivity layer interpreted as sand deposits; А1 — anomalous zone of maximum mismatch between the UAV-based CSEM and ERT results. In the geological section the layer boundaries constrained by borehole data and previous studies: 1 — sand, 2 — loam, 3 — clay, 4 — limestone, 5 — sandy loams 6 — borehole location

Анташук К. М., Атаков А. И., Кочеров А. Б., Голубев С. А. Технология беспилотных электромагнитных зондирования: опыт применения и перспективы развития // Инженерная и рудная геофизика 2023. Морские технологии 2023. Инженерная и рудная геофизика 2023 : сб. материалов конф. М. : ЕАГЕ Геомодель, 2023. С. 459–465.

Тригубович Г. М., Чернышев А. В., Куклин А. В., Еременко С. И., Симаков А. Е. Малоглубинная беспилотная электроразведка: БАС-μ3СБ // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геофизика 2024 : материалы конф. М. : Геомодель Развитие, 2024. С. 53–56.

Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., De Guidi G. UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: The case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily) // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2021. Vol. 21, no. 9. P. 2881–2898.

De Smet T. S., Nikulin A., Romanzo N., Graber N., Dietrich Ch., Puliaiev A. Successful application of drone-based aeromagnetic surveys to locate legacy oil and gas wells in Cattaraugus county, New York // *Journal of Applied Geophysics*. 2021. Vol. 186. P. 104250. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104250>

Gailler L., Labazuy Ph., Régis E., Bontemps M., Souriot Th., Bacques G., Carton B. Validation of a new UAV magnetic prospecting tool for volcano monitoring and geohazard assessment // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 5. P. 894. <https://doi.org/10.3390/rs13050894>

Hao J., Zhang X., Wang Ch., Wang H., Wang H. Application of UAV digital photogrammetry in geological investigation and stability evaluation of high-steep mine rock slope // *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 3. P. 198. <https://doi.org/10.3390/drones7030198>

Mu Y., Zhang X., Xie W., Zheng Y. Automatic detection of near-surface targets for unmanned aerial vehicle (UAV) magnetic survey // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 3. P. 452. <https://doi.org/10.3390/rs12030452>

Niedzielski T. Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences: Introduction // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175. P. 3141–3144. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1992-9>

Schmidt V., Becken M., Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site // *First Break*. 2020. Vol. 38, no. 8. P. 61–66. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020061>

Xing K., Li Sh., Qu Zh., Gao M., Gao Y., Zhang X. UAV time-domain electromagnetic system and a workflow for subsurface targets detection // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 330. <https://doi.org/10.3390/rs16020330>

Zheng Y., Li Sh., Xing K., Zhang X. Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: A review on platform selection and interference suppression // *Drones*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 93. <https://doi.org/10.3390/drones5030093>

REFERENCES

Antashchuk K. M., Atakov A. I., Burdukov T. K., Teremkov A. V., Kocherov A. B. (2024). Electromagnetic sounding

technology using an unmanned platform. In *Engineering and Ore Geophysics 2024. Engineering and Ore Geology 2024* (pp. 57–61) [Sci. conf. proc.]. Moscow: Geomodel Development. (In Russ.).

Antashchuk K. M., Atakov A. I., Kocherov A. B., Golubev S. A. (2023). Unmanned electromagnetic sounding technology: Application experience and development prospects. In *Engineering and Ore Geophysics 2023. Marine Technologies 2023. Engineering and Ore Geology 2023* (pp. 459–465) [Sci. conf. proc.]. Moscow: EAGE Geomodel. (In Russ.).

Trigubovich G. M., Chernyshev A. V., Kuklin A. V., Eremenko S. I., Simakov A. E. (2024). Shallow-depth unmanned electrical prospecting: UAV-μNTES. In *Engineering and Ore Geophysics 2024. Engineering and Ore Geology 2024* (pp. 53–56) [Sci. conf. proc.]. Moscow: Geomodel Development. (In Russ.).

Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., De Guidi G. (2021). UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: The case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(9), 2881–2898.

De Smet T. S., Nikulin A., Romanzo N., Graber N., Dietrich Ch., Puliaiev A. (2021). Successful application of drone-based aeromagnetic surveys to locate legacy oil and gas wells in Cattaraugus county, New York. *Journal of Applied Geophysics*, 186, 104250. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104250>

Gailler L., Labazuy Ph., Régis E., Bontemps M., Souriot Th., Bacques G., Carton B. (2021). Validation of a new UAV magnetic prospecting tool for volcano monitoring and geohazard assessment. *Remote Sensing*, 13(5), 894. <https://doi.org/10.3390/rs13050894>

Hao J., Zhang X., Wang Ch., Wang H., Wang H. (2023). Application of UAV digital photogrammetry in geological investigation and stability evaluation of high-steep mine rock slope. *Drones*, 7(3), 198. <https://doi.org/10.3390/drones7030198>

Mu Y., Zhang X., Xie W., Zheng Y. (2020). Automatic detection of near-surface targets for unmanned aerial vehicle (UAV) magnetic survey. *Remote Sensing*, 12(3), 452. <https://doi.org/10.3390/rs12030452>

Niedzielski T. (2018). Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences: Introduction. *Pure and Applied Geophysics*, 175, 3141–3144. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1992-9>

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

Xing K., Li Sh., Qu Zh., Gao M., Gao Y., Zhang X. (2024). UAV time-domain electromagnetic system and a workflow for subsurface targets detection. *Remote Sensing*, 16(2), 330. <https://doi.org/10.3390/rs16020330>

Zheng Y., Li Sh., Xing K., Zhang X. (2021). Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: A review on platform selection and interference suppression. *Drones*, 5(3), 93. <https://doi.org/10.3390/drones5030093>

Ксения Михайловна Анташук

Независимый исследователь

<https://orcid.org/0000-0001-5777-1314>

Scopus Author ID 36661859800

WoS ResearcherID H-5846-2013

РИНЦ SPIN-код 2381-5951

antashchuk@list.ru

Kseniia M. Antashchuk

Independent researcher

<https://orcid.org/0000-0001-5777-1314>

Scopus Author ID 36661859800

WoS ResearcherID H-5846-2013

RSCI SPIN-code 2381-5951

antashchuk@list.ru

Алексей Игоревич Атаков

Директор Центра геофизического обеспечения
региональных геолого-съемочных работ

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

Scopus Author ID 57245821700
aleksei_atakov@karpinskyinstitute.ru

Антон Борисович Кочеров

Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий геофизик Центра геофизического обеспечения
региональных геолого-съемочных работ

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0007-6209-753X>
Scopus Author ID 57246028500
РИНЦ SPIN-код 4035-6461
anton_kocherov@karpinskyinstitute.ru

Сергей Алексеевич Голубев

Ведущий геофизик Центра геофизического обеспечения
региональных геолого-съемочных работ

Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

РИНЦ SPIN-код 8533-6062
sergey_golubev@karpinskyinstitute.ru

Андрей Валерьевич Теремков

Главный специалист

ООО «АЛПОМ»,
Санкт-Петербург, Россия

РИНЦ SPIN-код 9706-6710
inbox@alpom.ru

Aleksey I. Atakov

Director, Center of Geophysical Support
of Regional Geological Surveys

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

Scopus Author ID 57245821700
aleksei_atakov@karpinskyinstitute.ru

Anton B. Kocherov

PhD (Geology and Mineralogy),
Leading Geophysicist, Center of Geophysical Support
of Regional Geological Surveys

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0007-6209-753X>
Scopus Author ID 57246028500
RSCI SPIN-code 4035-6461
anton_kocherov@karpinskyinstitute.ru

Sergey A. Golubev

Leading Geophysicist, Center of Geophysical Support
of Regional Geological Surveys

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

RSCI SPIN-code 8533-6062
sergey_golubev@karpinskyinstitute.ru

Andrey V. Teremkov

Chief Specialist

ALPOM,
Saint Petersburg, Russia

RSCI SPIN-code 9706-6710
inbox@alpom.ru

Вклад авторов: Антащук К. М. — определение концепции, работа с данными, анализ данных, проведение исследования, определение методологии, руководство исследованием, валидация, визуализация, написание черновика рукописи, пересмотр и редактирование рукописи.

Атаков А. И. — определение концепции, разработка методологии, администрирование проекта, обеспечение исследования, руководство исследованием, пересмотр и редактирование рукописи.

Кочеров А. Б. — определение концепции, работа с данными, анализ данных, разработка методологии, программное обеспечение, пересмотр и редактирование рукописи.

Голубев С. А. — работа с данными, проведение исследования.

Теремков А. В. — проведение исследования, разработка аппаратуры, программное обеспечение.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Antashchuk K. M. — conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, methodology, supervision, validation, visualization, original draft, review and editing.

Atakov A. I. — conceptualization, methodology, project administration, resources, supervision, review and editing.

Kocherov A. B. — conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, software, review and editing.

Golubev S. A. — data curation, investigation. Teremkov A. B. — investigation, equipment development, software.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 21.05.2025
Одобрена после рецензирования 14.07.2025
Принята к публикации 23.06.2026

Submitted 21.05.2025
Approved after reviewing 14.07.2025
Accepted for publication 23.06.2026