



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК: 3179

EDN: PQZKDA

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261

Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии

И.В. Трофимов^a, А.С. Башкеев^b, В.А. Савченко^c, И.О. Коншин^d^{a-d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^cИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Современная ситуация в горно-геологической отрасли требует ускорения и удешевления поисковых работ. Значительные перспективы для оптимизации геофизической разведки на сложноподходимых площадях с проблемным гальваническим заземлением имеют наземные бесконтактные методы и методы с применением беспилотных летательных аппаратов. Цель данного исследования заключалась в представлении результатов использования бесконтактной электроразведки (бесконтактное измерение электрического поля), обычно используемой при инженерных изысканиях, и магниторазведочных работ с применением беспилотных летательных аппаратов. Данный комплекс был направлен на поиск коренного золота в Бодайбинском районе Иркутской области. В работе дана краткая геологическая (геофизическая) ситуация и обоснование рациональной методики измерений. Геофизические работы проводились в масштабе 1:10000. Помимо этого, выполнено сопоставление полученных данных с областью применения бесконтактной технологии метода сопротивлений и предложены дополнительные и необходимые пункты к устоявшейся методике измерений. Установлено, что предложенный комплекс позволяет уверенно картировать основные перспективные на золотое оруденение геологические структуры за более короткий срок выполнения полевых работ.

Ключевые слова: бесконтактные измерения электрического поля, магниторазведка, беспилотный летательный аппарат, коренное золото, Вега

Для цитирования: 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.

GEOPHYSICS

Original article

Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium

Ilya V. Trofimov^a, Aur S. Bashkeev^b, Valentin A. Savchenko^c, Igor O. Konshin^d^{a-d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^cA.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The current situation in the mining and geological industry requires acceleration and reduction of the cost of exploration works. Ground-based contactless methods as well as methods using unmanned aerial vehicles have significant prospects for geophysical exploration optimization in difficult-to-access areas with faltering galvanic grounding. The purpose of the study is to present the results of both the use of contactless electrical exploration (electric field contactless measurement), which is commonly used in engineering surveys, and magnetic exploration performed with the use of unmanned aerial vehicles. The complex is aimed at searching for primary gold in the Bodaibo district of the Irkutsk region. The paper provides a brief description of the geological (geophysical) situation and justifies a rational measurement

© Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О., 2024



method. Geophysical works have been carried out on a scale of 1:10000. Also, the obtained data have been compared with the application field of the contactless technology of the resistivity method. As a result, additional and necessary theses have been proposed for the long-held measurement technique. It has been determined that the proposed complex allows confident mapping of the main geological structures promising for gold mineralization in a shorter period of field work.

Keywords: electric field contactless measurements, magnetometry, unmanned aerial vehicle, primary gold, Vega

For citation: 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.

Введение

Существует большое количество электро-разведочных методов и методик съемки, существенно отличных друг от друга по целевому назначению и применимости к конкретным геологическим условиям. Выбор оптимальной методики электроразведочных работ зачастую представляет собой проблему. Значительный интерес в настоящее время имеют экспрессные площадные и при этом детальные геофизические работы, позволяющие картировать геологические структуры и не пропускающие объекты, которые ранее были не обнаружены при региональных или среднемасштабных исследованиях. Требуемый на поисковой стадии масштаб – не крупнее 1:10000, причем чаще всего используется 1:5000.

Для решения рудных задач зачастую используются гальванические методы, например, электротомография или СГ-ВП. Они обеспечивают высокую детальность и позволяют расчлнить верхнюю часть разреза, но при этом требуют большого количества времени и хорошего качества заземления, что не всегда возможно из-за курумов, болот, мерзлоты. Устаревшие методы профилирования типа ВП-СГ не позволяют изучать геологическое строение участка на глубину и даже не обеспечивают достоверное понимание глубинности работ. Методы электротомографии позволяют получать геофизические разрезы, но весьма дороги и недоступны для постановки в площадном варианте на поисковой стадии. Это приводит к необходимости создания новых экспрессных и дешевых методик, которые при этом обеспечивали бы не только профилирование, но и зондирование.

Одним из перспективных направлений электроразведки является бесконтактная технология метода сопротивлений (БИЭП). Данный метод уже описан во множестве работ различ-

ных российских и зарубежных авторов [1–4]¹. Основной принцип схож с принципом действия четырехэлектродной установки вертикального электрического зондирования. Принципиальная разница в том, что в БИЭП используется незаземленный диполь или пластина, тем самым получается емкостное заземление.

Это делает возможным проведение электроразведочных работ в северных районах, где гальваническое заземление либо затруднено, либо же попросту невозможно. Также БИЭП позволяет значительно упростить и ускорить процесс выполнения полевых измерений за счет своей методики измерений по сравнению с гальваническими модификациями метода сопротивлений [5–7]². На рис. 1 приведена концептуальная схема измерительной установки.

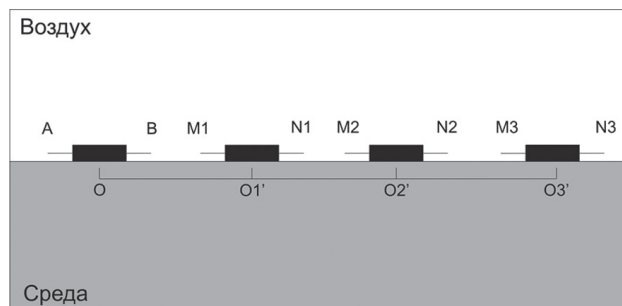


Рис. 1. Схема измерительной установки, использующейся при применении бесконтактных методов (дипольно-осевая расстановка)

Fig. 1. Diagram of the measuring unit for contactless methods (dipole-axial arrangement)

Данная технология была апробирована в геофизическом комплексе совместно с магниторазведкой с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), где магниторазведка была в качестве основного квартирующего метода и уже успела зарекомендовать себя в подобных работах [8]. Использование

¹ Тархова А.Г. Справочник геофизика. Электроразведка. М.: Гостопттехиздат, 1963. 583 с.

² Груздев А.И. Определение области применения бесконтактной технологии метода сопротивлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10. М., 2017. 22 с.



БИЭП в комплексе обусловлено перспективами дальнейшего прироста данных; изучалась возможность дополнительного расчленения на подсвиты и пачки основных структурных подразделений, которые, как известно, уверенно картируются в Бодайбинском районе и смежных районах участках Байкало-Патомского нагорья по данным БПЛА-магниторазведки и радиометрии [9–11]. В случае успешного решения данной проблемы за счет БИЭП, становится возможным быстро, точно и с небольшими затратами осуществлять выбор участков для бурения и горных работ.

Объекты работ. В статье показаны результаты, полученные на двух участках Бодайбинского синклинория с типичными ландшафтно-морфологическими и геологическими условиями. Первая площадь электроразведочных работ составила 5 км², вторая – 8 км². Таким образом, общая площадь составила 13 км².

Участок № 1 характеризовался залесенностью на больших перепадах высот (соотношение пройденного пути по профилю и подъема могло достигать 1:1), что сопряжено с опас-

ностью получения травм участников полевого отряда и выводу из строя аппаратуры при неосторожном использовании. На относительно ровных участках (вершины гор) подобной залесенности не наблюдалось (рис. 2). Исходя из соображений безопасности и скорости работ, съемка в местах со сложной проходимостью не проводилась, из-за чего карта фактического материала имеет разрывы и отсутствующие части в пределах границ съемки.

Участок № 2 характеризовался относительно участка № 1 более сильной залесенностью даже на равнинах и малыми изменениями высотных отметок. С одной стороны, такая площадь является удобной для выполнения электроразведочной съемкой аппаратурой «Вега», так как участок более пологий, но выявилась проблема с радиосвязью аппаратурных элементов между собой (генератор/датчик – полевой компьютер).

Основные геологические подразделения. Аунакитская свита ($R_3au_2^2$) подразделяется на три подсвиты: нижнюю, среднюю и верхнюю. Многие крупные месторождения в Бодайбин-



Рис. 2. Фото участка работ
Fig. 2. Work site image



ском районе связаны с наличием аунакитской свиты, а именно – верхней пачкой ее средней подсвиты au_2^2 (рис. 3). Это геологическое подразделение сложено черными сланцами и должно проявляться низкоомной аномалией за счет высокой углеродистости. Нижняя же пачка (au_2^1) является слабоуглеродистой и имеет высокие значения удельного электрического сопротивления³⁻⁵.

Вачская свита (R_3vc) слагает крылья и замки синклиналей и является региональным маркирующим горизонтом. Свита согласно залегает на породах аунакитской свиты с резко выраженным контактом. Сверху она перекрыта образованиями анангской свиты, с которой контакт неясный, и формирует переходную пачку мощностью до 5 м. Породы свиты представляют высокоуглеродистые микросланцы, метаалевролиты, тонкие метапесчаники. Доминирующую позицию в разрезе занимают метаалевролиты серицит-кварцевой состава.

Образования анангской свиты (V_1an) традиционно подразделяют на две подсвиты, характеризующиеся различными условиями седиментогенеза и соответственно различными типами пород. Породы подвержены метасоматическим процессам, проявленным в виде мелкоочечной лимонитизации по карбонатным вкрапленникам анкерит-сидеритового ряда.

В строении нижней подсвиты догалдынской свиты (V_1dg_1) по вещественному составу выделяются две пачки: нижняя песчаниковая углеродистая и верхняя сланцево-песчаниковая. Разрез нижней пачки ($V_1dg_1^1$) представлен в нижней части темно-серыми углеродистыми мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми метапесчаниками с редкими прослоями темно-серых углеродистых алевролитовых сланцев. Верхняя пачка ($V_1dg_1^2$) характеризуется грубым переслаиванием зеленовато-серых, серых разнозернистых метапесчаников с резко подчиненными прослоями темно-серых углеродистых алевролитовых сланцев.

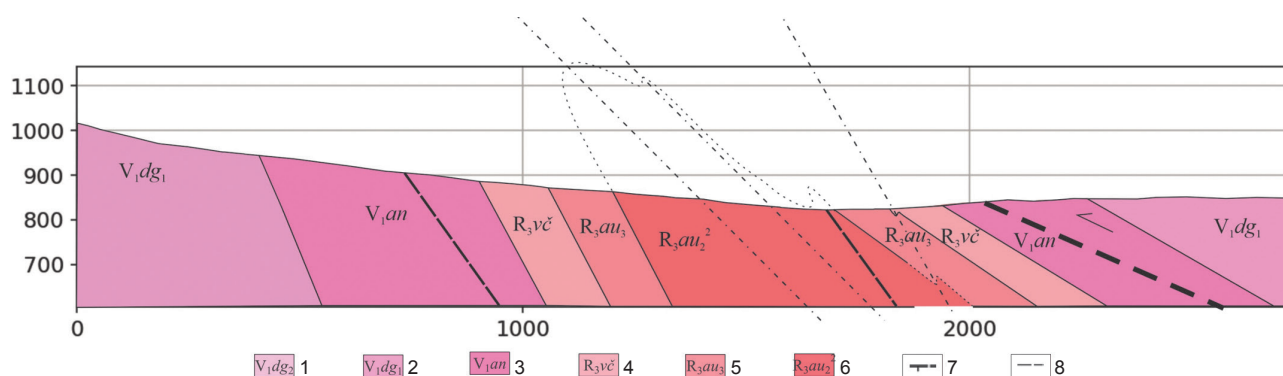


Рис. 3. Типичный геологический разрез перспективных площадей в Бодайбинском районе 1:10000:

- 1 – догалдынская свита, средняя подсвита (песчаники темно-серые кварцевые с гематитом); 2 – догалдынская свита, нижняя подсвита (песчаники светло-серые и зеленовато-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые);
 - 3 – анангская свита (песчаники серые неравномерно-средне-мелкозернистые кварц-слюдисто-полевошпатовые);
 - 4 – вачская свита (сланцы черные слюдисто-углеродисто-кремнистые); 5 – аунакитская свита, верхняя подсвита (песчаники светло-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 6 – аунакитская свита, средняя подсвита, верхняя пачка (темно-серые сланцы кремнисто-углеродисто-слюдистые);
 - 7, 8 – предполагаемые разрывные нарушения: 7 – надвиги, 8 – без видимого смещения
- Fig. 3. Typical geological section of promising areas in the Bodaibo district 1:10000:**
- 1 – Dogaldyn suite, middle subformation (dark grey quartz sandstones with hematite); 2 – Dogaldyn suite, lower subformation (light grey and greenish-grey quartz-mica-feldspar sandstones);
 - 3 – Anangra suite (grey uneven medium-fine grained quartz-mica-feldspar sandstones);
 - 4 – Vacha suite (black mica carbonaceous silica shales); 5 – Aunakit suite, upper subformation (light grey quartz-mica-feldspar sandstones); 6 – Aunakit suite, middle subformation, upper member (dark grey silica-carbonaceous-mica shales);
 - 7, 8 – supposed faults: 7 – thrusts, 8 – no visible displacement

³ Кулаков А.Р. Отчет о результатах геофизических в пределах Мараканской рудоносной площади Бодайбинского рудного района за 1979–1982 гг. Иркутск, 1983.

⁴ Агеев Ю.А., Яблоновский Б.В. Отчет Соргинской партии по результатам геологического доизучения масштаба 1:50000, проведенного в 1976–1979 гг. Иркутск, 1981.

⁵ Григоров Э.Н. Отчет Ныгиринской партии по геологическому доизучению масштаба 1:50000 по работам 1975–1977 гг. Иркутск, 1987.



Материалы и методы исследования

Электроразведочные работы проводились высокочастотной электроразведочной станцией «Вега». Данная станция предназначена для проведения электроразведочных работ методом электропрофилирования и вертикального электрического зондирования бесконтактным методом (дипольное электрическое зондирование). «Вега» является многоканальной и позволяет работать с использованием четырех приемных датчиков одновременно.

Рабочая частота станции составляет 16 кГц, что является достаточно высокой частотой даже для бесконтактных измерений. Она позволяет работать лишь при разносах до 100 м. Генераторный блок станции позволяет зафиксировать выдаваемый ток на четырех значениях: 1, 3, 10 и 30 мА⁶. Также можно работать в режиме, при котором фиксации тока нет, и он может изменяться от записи к записи. Формула расчета кажущегося сопротивления имеет следующий вид:

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I}.$$

При выполнении измерений на первой площади использовались диполи длиной 7,5 м. Расстояния между генератором и датчиками составляли 45, 67,5, и 90 м. Измерения проводились при фиксированном токе в 3 мА. Шаг по профилю составил 10 м.

На второй площади использовались диполи длиной 10 м. Разносы между генератором и датчиками составили 20, 40 и 60 м. Измерения проводились при динамически изменяющимся токе от 5 мА до 26 мА. Шаг по профилю составлял 20 м.

По результатам работ получены карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления на глубине, равной половине от разноса.

Для выполнения БПЛА-магнитометрии использовался мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS с оверхаузеровским магнитометром семейства POS [9–11]. Для подготовки полетного задания с обтеканием рельефа использовался модуль SibGIS FlightPlanner [10]. Погрешность высоты установлена в пределах 10 % от номинальной высоты и постоянной скоростью полета, базовая высота съемки составляла 45 м от земли до датчика.

Скорость полета составляла 9 м/с. Измерения проводились 2 раза в секунду. Также, в соответствии с требованиями к маловысотной

магниторазведочной съемке, использовалась вариационная станция, которая выполняла наблюдения каждые 10 секунд.

Параллельно с геофизическими работами также были выполнены несколько опорных геологических маршрутов для более достоверной интерпретации геофизических данных. В то же время изучаемые площади характеризуются низкой степенью обнаженности, в связи с чем достоверно картировать контакты перспективных подразделений довольно проблематично. Общая протяженность маршрутов составила 8 км.

Результаты исследования и их обсуждение

Как уже сказано ранее, многие крупные месторождения в Бодайбинском районе приурочены к ограниченному количеству структурно-вещественных позиций, одной из которых является приуроченность к близъядерным частям антиклиналей с присутствием аунакитской свиты (ау)^{3–5}. Изучение возможностей обсуждаемого комплекса методов по картированию такой геологической обстановки и являются предметом данной работы, при этом на участке исследования № 1 проводились в пределах свиты (для разбиения свиты на подсвиты), а на втором работы проводились для уточнения границ геологических структур всего разреза, который представлен на рис. 3.

Участок № 1. По результатам электроразведочной съемки были выделены следующие подсвиты: средняя (ау₂) и верхняя (ау₃). Верхняя подсвита выделяется более высокими значениями сопротивления по сравнению со средней подсвитой (рис. 4).

Участок № 2. На рис. 5 представлена геологическая карта масштаба 1:50000, на которую были наложены результаты электроразведочной съемки.

По результатам анализа электроразведочной съемки (см. рис. 5) разделить геологический разрез (см. рис. 3) можно на три области по сопротивлению: Высокоомную (аунакитская свита), низкоомную (анангская свита) и область со средними значениями сопротивления (вачская и догалдынская свиты).

Анализ области применения и контроль данных. Для анализа возможностей методов БИЭП по картированию горных пород с различными сопротивлениями и на различных глубинах были построены два графика зави-

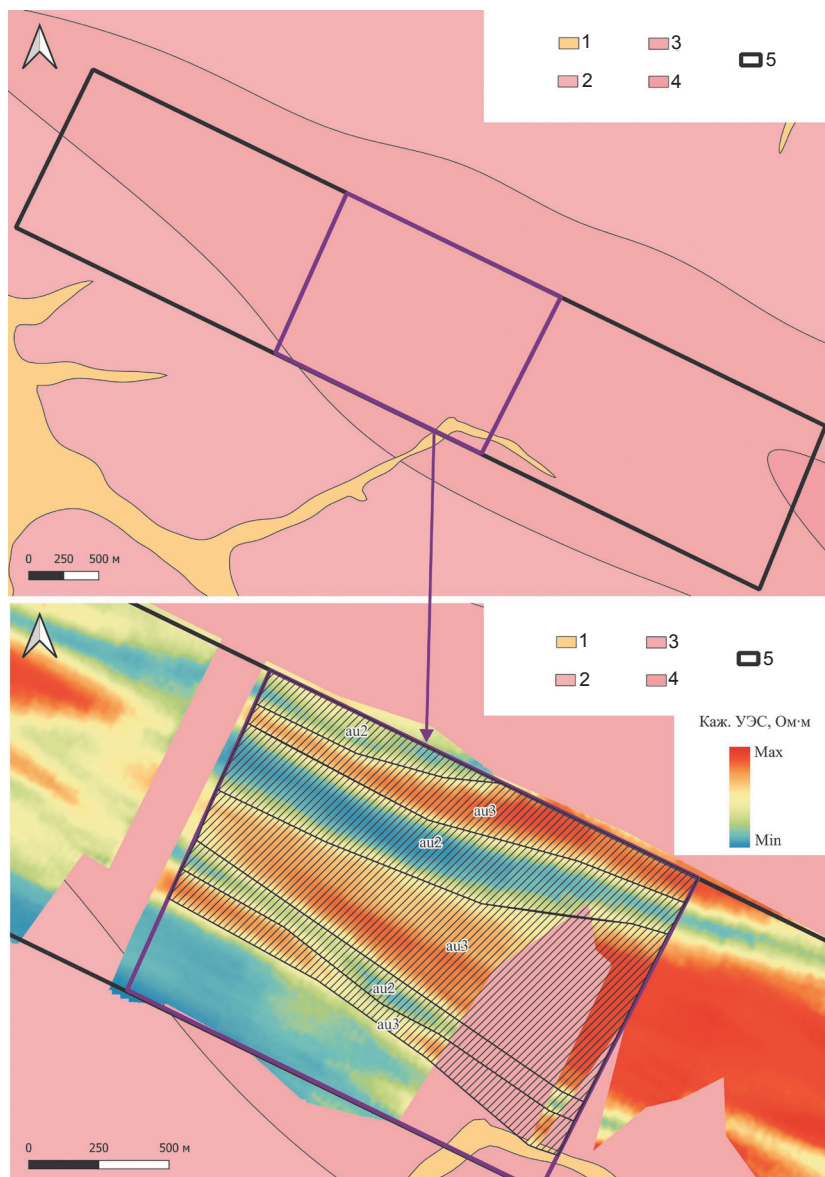


Рис. 4. Результаты электроразведочной съемки на участке № 1 на псевдоглубине исследования 45 м:

а – обзорная карта площади работ № 1; **б** – выделенная фиолетовым цветом часть площади
1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – аунакитская свита, верхняя подсвита;
3 – аунакитская свита, средняя подсвита; 4 – аунакитская свита, нижняя подсвита;
5 – граница участка № 1

Fig. 4. Electrical exploration survey results on the site no. 1 at the investigation pseudo-depth of 45 m:

a – location map of the site no. 1; **b** – part of the site highlighted in purple
1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Aunakit suite, upper subformation;
3 – Aunakit suite, middle subformation; 4 – Aunakit suite, lower subformation;
5 – boundary of the site no. 1

симости кажущегося сопротивления от разно-
са между генератором и приемником (рис. 6)².

Серым цветом обозначена область для ус-
ловия поднятия измерительной установки на 30
см от поверхности. Область применения БИЭП
уменьшается с левой стороны при поднятии
установки над поверхностью (выделено голу-
бым цветом). В действительности не удастся

располагать измерительную установку меньше,
чем в 10 см над поверхностью земли из-за тра-
вы, мха и кустов. Это говорит о том, что нижней
возможной границей помех при проектировании
работ стоит считать именно зеленую линию.

Из рис. 6 видно, что лишь менее 50 % изме-
рений попадает в область количественной ин-
терпретации. Из-за этого результаты инверсии

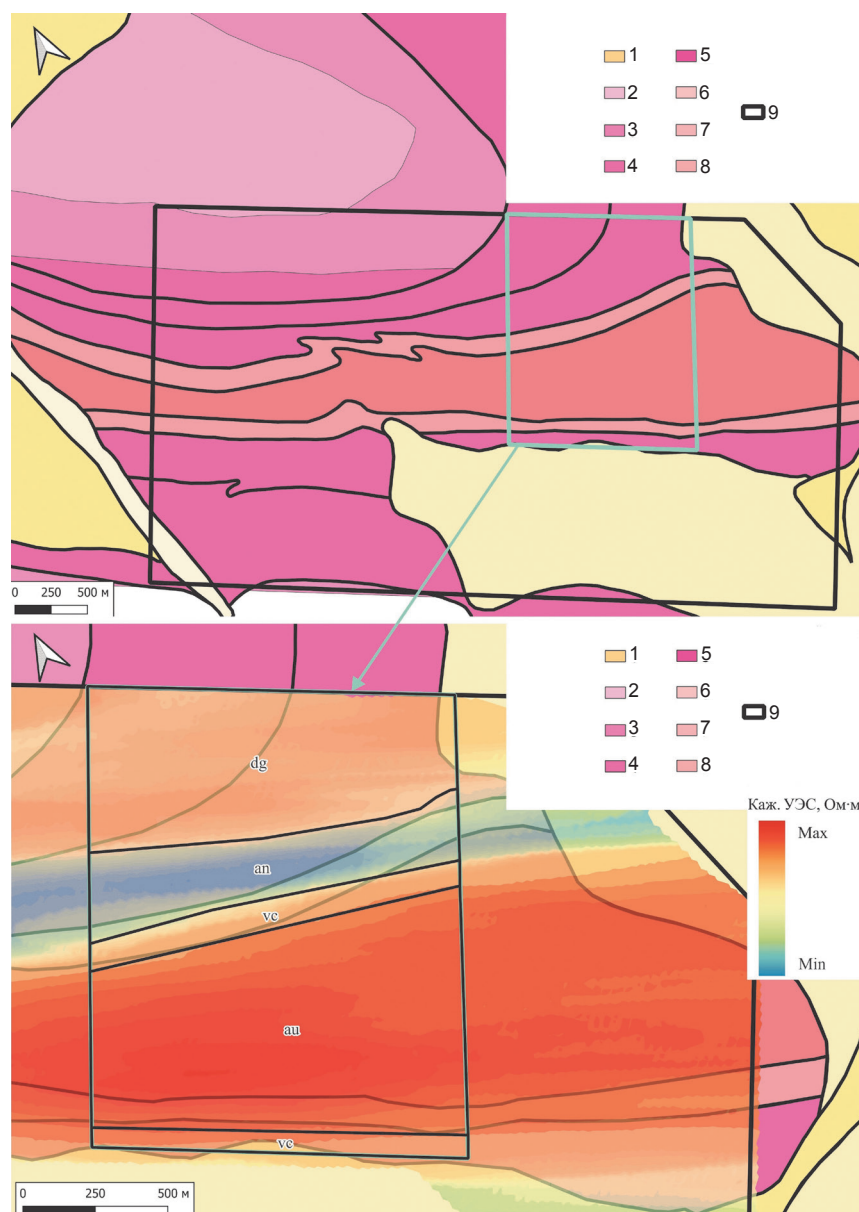


Рис. 5. Геологическая карта предшественников

и результаты электроразведочной съемки на псевдоглубине 20 м:

- a* – обзорная карта площади работ № 2; *b* – выделенная бирюзовым цветом часть площади
 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – догалдынская свита, средняя подсвита; 3 – догалдынская свита, нижняя подсвита; 4 – анангская свита, верхняя подсвита; 5 – анангская свита, нижняя подсвита;
 6 – вачская свита; 7 – аунакитская свита, верхняя подсвита; 8 – аунакитская свита, средняя подсвита;
 9 – граница участка № 2

Fig. 5. Geological map of predecessors

and electrical exploration survey results at the pseudo-depth of 20 m:

- a* – location map of the site no. 2; *b* – part of the site highlighted in turquoise
 1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Dogaldyn suite, middle subformation; 3 – Dogaldyn suite, lower subformation; 4 – Anangra suite, upper subformation; 5 – Anangra suite, lower subformation;
 6 – Vach suite; 7 – Aunakit suite, upper subformation; 8 – Aunakit suite, middle subformation;
 9 – boundary of the site no. 2

должны вызывать множество вопросов. Исходя из рабочей частоты и используемых геометрических параметров установки многоканальный режим аппаратуры «Вега», полученные данные являются фактически бессмысленными для численного моделирования, и такие дан-

ные должны рассматриваться только с точки зрения качественной интерпретации.

Также помимо данных, которые попадают в раскрашенную зону, есть и значения вне области применения. В таких случаях можно говорить о том, что среда в точке, где прово-

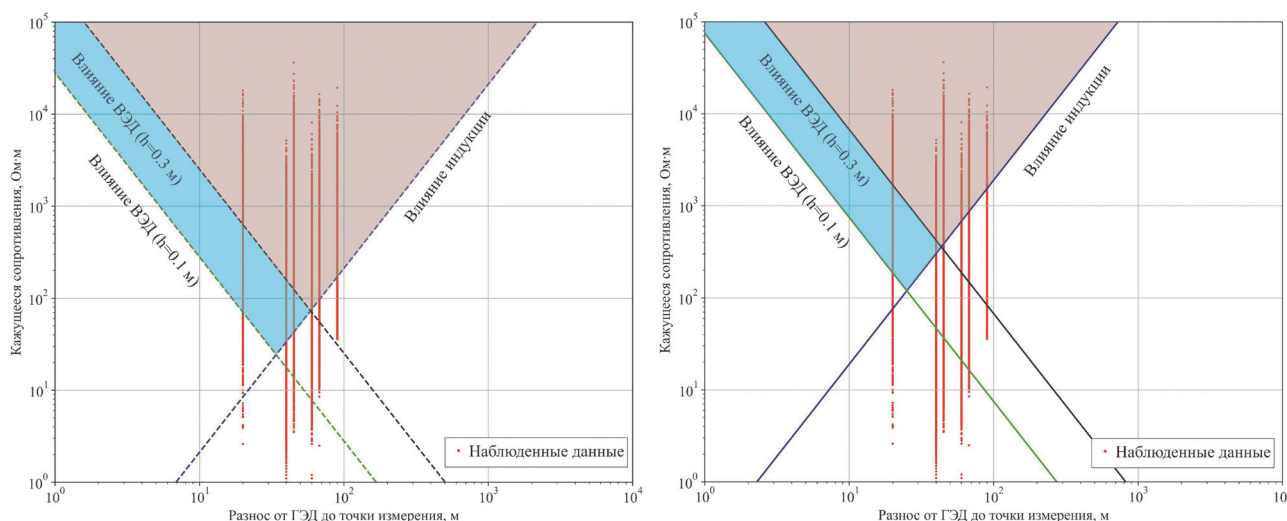


Рис. 6. Область применения бесконтактной технологии метода сопротивлений:
а – качественная интерпретация; б – количественная интерпретация
ВЭД – вертикальный электрический диполь; ГЭД – горизонтальный электрический диполь
Fig. 6. Application area of the contactless technology of resistivity method:
а – qualitative interpretation; б – quantitative interpretation
VED – vertical electric dipole; HED – horizontal electric dipole

дилось измерение, характеризуется близповерхностным проводником.

С целью контроля качества полевых наблюдений на обоих участках исследования было выполнено более 5 % контрольных измерений от общего объема работ. Общее среднеквадратическое отклонение по параметру кажущегося удельного электрического сопротивления составило менее 10 Ом·м. Пример сходимости контрольных и наблюдаемых (рядовых) измерений представлен на рис. 7.

Совместная геолого-геофизическая интерпретация. Результатом совместной гео-

лого-геофизической интерпретации стали две уточненные геологические карты. Для примера возьмем участок № 2, так как именно на нем электроразведочные работы пересекли несколько структурных комплексов.

Беспилотная маловысотная аэромагнитная съемка позволяет выделить верхнюю пачку средней подсвиты аунакитской свиты верхнего рифея $R_3au_2^2$ по положительной аномалии модуля вектора напряженности магнитного поля, R_3au_3 – по значениям, переходным к более низким. Вачская свита $R_3v\psi$ выделяется по внешней границе отрицательной магнитной анома-

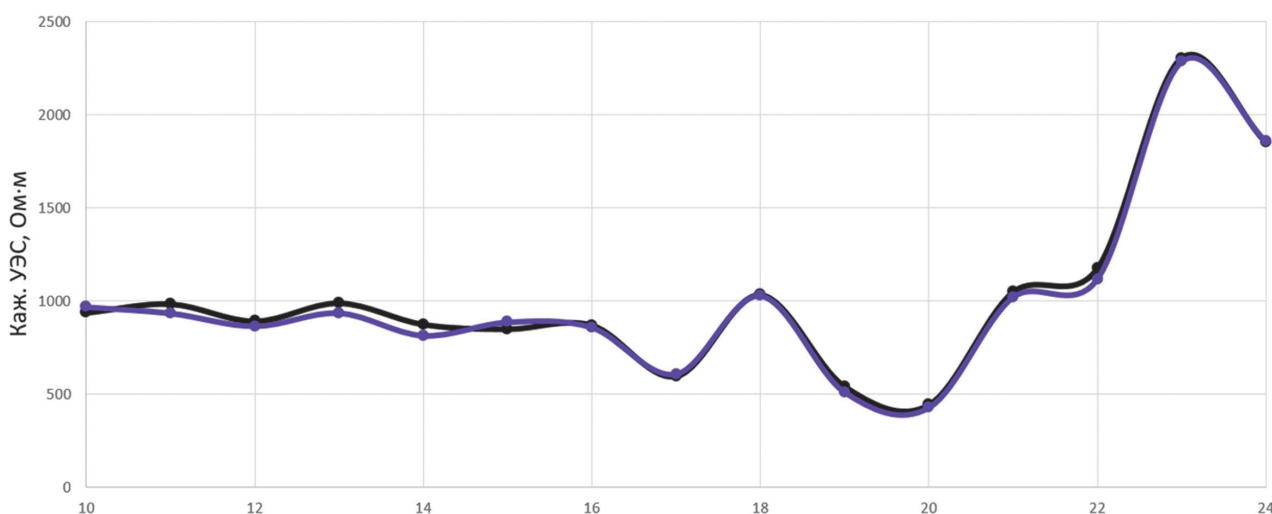


Рис. 7. График сходимости контрольных и рядовых измерений по одному из профилей на нескольких пикетах (псевдоглубина измерений 10 м)
Fig. 7. Convergence graph of control and routine measurements along one of the profiles at several stations (measurement pseudo-depth is 10 m)



лии, которая отражает область распространения пород анангской свиты нижнего венда V_1an . Граница пород догалдынской свиты V_1dg характеризуется еще большим контрастным переходом от низких к высоким значениям, а контакт ее подсвит V_1dg_1 и V_1dg_2 подчеркнут узкой линейной отрицательной аномалией. Полученные линии наибольшего контраста магнитного поля согласуются с данными геологической съемки методом прямых наблюдений и были использованы для построения новой геологической карты участка (рис. 8).

Наземная электроразведка методом кажущихся сопротивлений, в дополнение к магниторазведке, позволяет дифференцировать среднюю и верхнюю подсвиты аунакитской свиты, а также вачскую свиту по зонам с разными диапазонами проводимости (см. рис. 4, 5). Догалдынская свита характеризуется отно-

сительно высоким сопротивлением, а зона переходных значений между догалдынской и вачской свитами соответствует полям выходов анангской свиты. Границы указанных областей заверяют полученные при магнитной и геологической съемке геологические границы.

Таким образом, каждое геологическое подразделение контрастно в магнитном поле или по кажущемуся сопротивлению, а половина из них, R_3au^2 , R_3au_3 , $R_3vč$, V_1dg_1 – в обоих полях, и результаты обеих съемок отлично увязываются между собой и с наблюдаемой геологической ситуацией (см. рис. 8).

По результатам съемки заметны отличия между данными геофизических работ и геологическими работами предшественников: так, простираение геологических структур продолжается на восток без особого смещения, хотя на геологической карте отмечено, что анангская

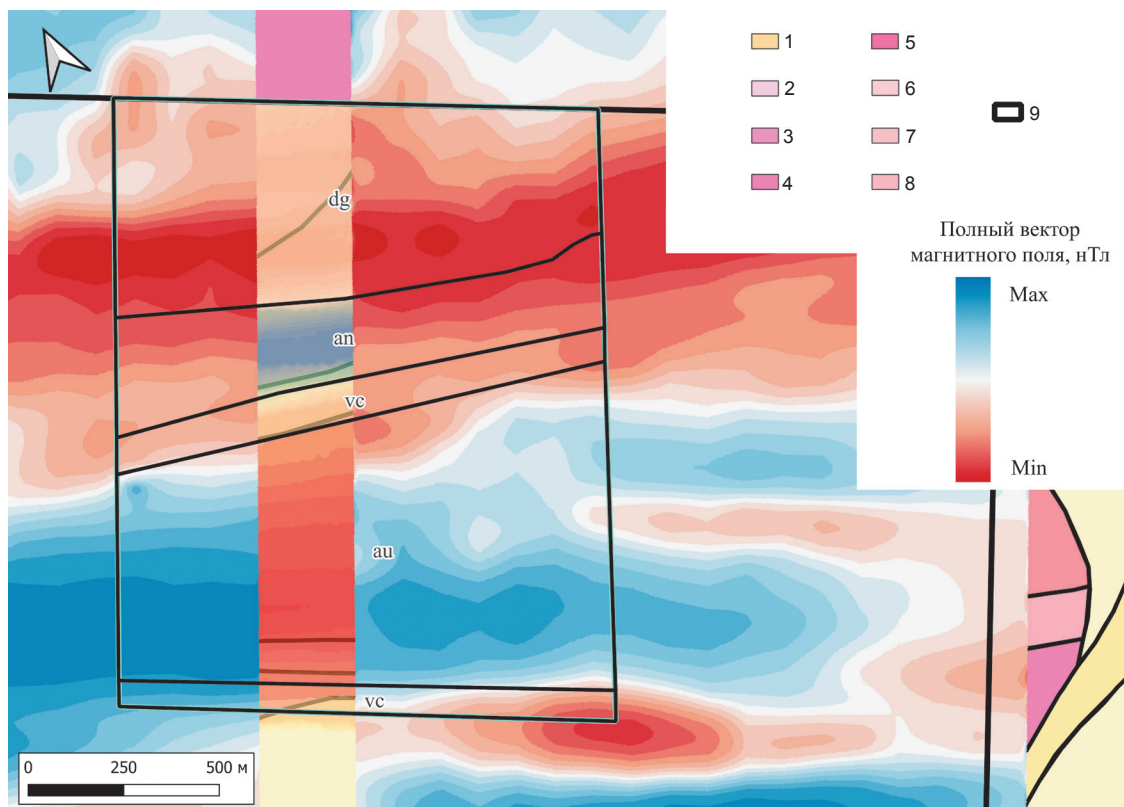


Рис. 8. Сопоставление геофизических съемок (контурами наложены результаты интерпретации электроразведочных данных):

- 1 – четвертичные отложения нерасчлененные; 2 – догалдынская свита, средняя подсвита; 3 – догалдынская свита, нижняя подсвита; 4 – анангская свита, верхняя подсвита; 5 – анангская свита, нижняя подсвита; 6 – вачская свита; 7 – аунакитская свита, верхняя подсвита; 8 – аунакитская свита, средняя подсвита; 9 – граница участка № 2

Fig. 8. Comparison of geophysical surveys

(contours indicate interpretation results of electrical exploration data):

- 1 – undifferentiated Quaternary deposits; 2 – Dogaldyn suite, middle subformation; 3 – Dogaldyn suite, lower subformation; 4 – Ananra suite, upper subformation; 5 – Ananra suite, lower subformation; 6 – Vach suite; 7 – Aunakit suite, upper subformation; 8 – Aunakit suite, middle subformation; 9 – boundary of site no. 2



свита на востоке смещается на север, на которой выполнено разделение аунакитской свиты на подсвиты, а также исправлено простираие анангской и догалдынской свит (рис. 9).

Таким образом, показано, что предложенный комплекс позволяет существенно (почти до 50 м) уточнить существующие геологические карты, что весьма важно для проектирования горных и буровых работ.

Заклучение

Показано, что комплекс БПЛА-магнитной съемки и бесконтактной электроразведки

позволяет существенно уточнить имеющиеся представления о геологическом строении площадей Бодайбинского синклинария, при этом магнитная съемка позволяет уверенно картировать геологические структуры, а электроразведка позволяет, в дополнение к этому, разделить перспективные структурно-вещественные подразделения (в данном случае – аунакитскую свиту) на среднюю сланцевую и верхнюю песчаниковую подсвиты.

Моделирование данных БИЭП показало слабый прирост результата от применения многоразносных установок, в связи с чем оп-

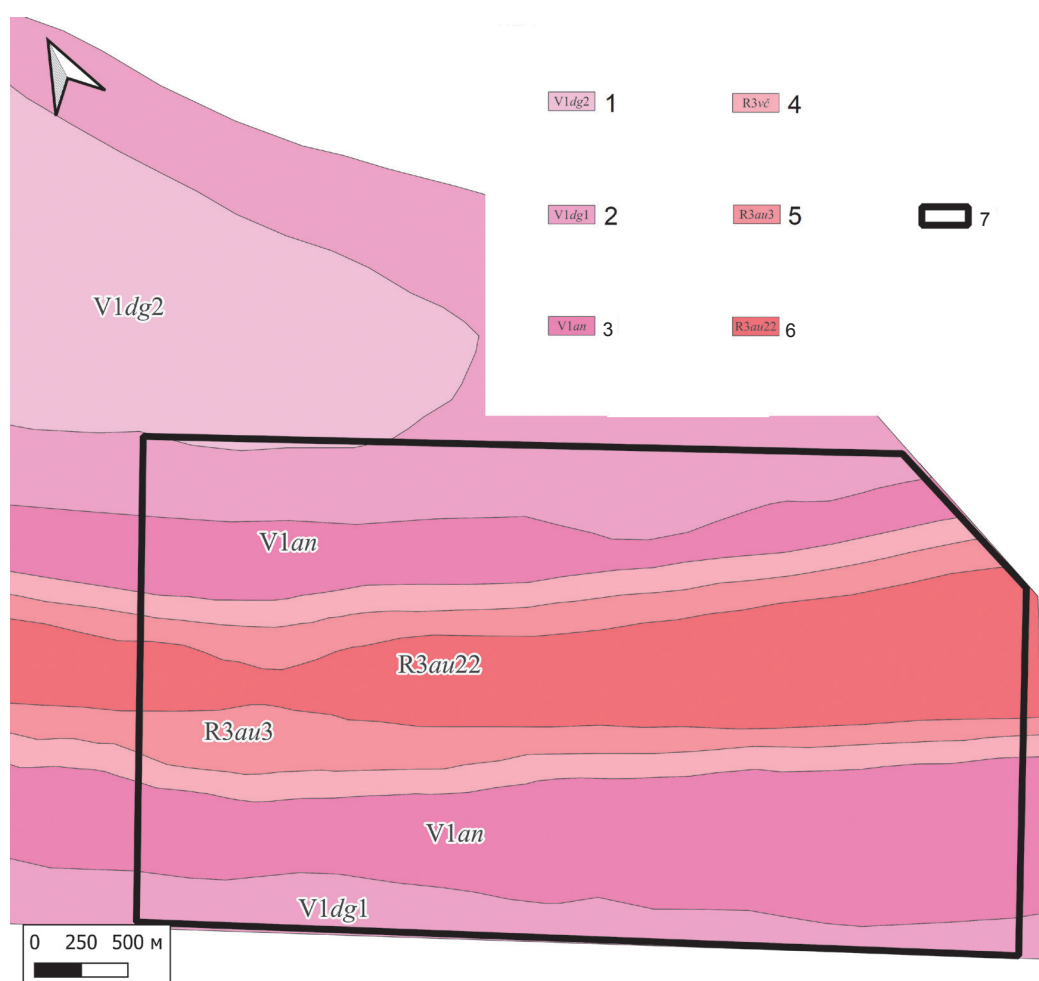


Рис. 9. Уточненная геологическая карта участка № 2:

- 1 – догалдынская свита, средняя подсвита (песчаники темно-серые кварцевые с гематитом); 2 – догалдынская свита, нижняя подсвита (песчаники светло-серые и зеленовато-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 3 – анангская свита (песчаники серые неравномерно-средне-мелкозернистые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 4 – вачская свита (сланцы черные слюдисто-углеродисто-кремнистые); 5 – аунакитская, верхняя подсвита (песчаники светло-серые кварц-слюдисто-полевошпатовые); 6 – аунакитская, средняя подсвита, верхняя пачка (темно-серые сланцы кремнисто-углеродисто-слюдистые); 7 – граница участка № 2

Fig. 9. Refined geological map of the site no. 2:

- 1 – Dogaldyn suite, middle subformation (dark grey quartz sandstones with hematite); 2 – Dogaldyn suite, lower subformation (light grey and greenish-grey quartz-mica-feldspar sandstones); 3 – Anangra suite (grey uneven-medium-fine-grained quartz-mica-feldspar sandstones); 4 – Vach suite (black mica-carbonaceous-silica shales); 5 – Aunakit suite, upper subformation (light grey quartz-mica-feldspar sandstones); 6 – Aunakit suite, middle subformation, upper member (dark grey silica-carbonaceous-mica shales); 7 – boundary of the site no. 2



тимальным вариантом можно считать профилирование на разносах 10–30 м.

Данный комплекс работ на каждом из участков были выполнены менее чем за месяц. На подобные работы методами, которые используют гальванические методы заземления, потребовалось бы в 1,5–2 раза больше времени, за счет постоянного заземления электродов от точки к точке. Таким образом, данный комплекс можно считать весьма рациональным.

Подобные работы, исходя из вышеописанного опыта, должны проводиться в режиме ограничения величины тока, как это было сделано на участке № 1. Иначе встает проблема с уравниванием по уровню каждого из профилей. Таким образом, несмотря на предпочтительный режим работы на высоких токах, для хорошего соотношения сигнал-шум съемку лучше производить на более меньшем токе. Так, в методике полевых измерений следует либо добавить

предварительные работы для определения максимально допустимого уровня тока, либо же следует снимать на нескольких токах одни и те же точки для анализа чувствительности.

По итогу проведенного исследования, на основе сопоставительного анализа геологических карт предшественников и полученных объективных данных геофизической разведки, можно сделать вывод о необходимости обязательного применения предлагаемого комплекса для опережающего геолого-геофизического картирования площадей Бодайбинского синклинория, так как показанные погрешности архивных геологических материалов безусловно приведут к лишним затратам на горные и буровые работы, существенно превышающим стоимость геофизической разведки предложенным комплексом. Помимо этого, для дальнейшего развития бесконтактной технологии, требуется аппаратный комплекс с меньшей рабочей частотой.

Список источников

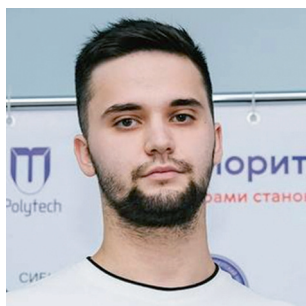
1. Нахабцев А.С., Сапожников Б.Г., Яблчанский А.И. Электропрофилерование с незаземленными рабочими линиями. Л.: Недра, 1985. 96 с.
2. Скороходов Л.М., Старовойтов В.Н., Якупов В.С. Использование метода индуктивного приема в зимних условиях // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР: сб. статей / под ред. Б.Б. Евангулова, Н.П. Аникеева, А.П. Васильковского [и др.]. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1958. Вып. 13. С. 150–155.
3. Якупов В.С. Метод вертикальной составляющей плотности тока // Ученые записки ЛГУ. 1960. № 12. С. 59–62.
4. Якупов В.С. К теории метода вертикальной составляющей плотности тока // Геокриологические исследования: сб. статей / под ред. И.А. Некрасова. Якутск: Якутское книжное издательство, 1971. С. 200–206.
5. Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // Разведка и охрана недр. 2002. № 10. С. 36–40.
6. Груздев А.И., Бобачев А.А. Особенности применения бесконтактных измерений в методе сопротивлений // Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития: сб. тр. конф. (г. Сочи, 28 сентября – 02 октября 2015 года). М.: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015. С. 178–183. EDN: UMRFSR.
7. 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.
8. Снегирев Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магнито-разведки 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.
9. Budyak A.E., Parshin A.V., Spiridonov A.M., Volkova M.G., Bryukhanova N.N., Bryansky N.V., et al. New results of geochemical and geophysical research of the Hadatkandsky fault zone (North Transbaikalian region) // Russian Journal of Pacific Geology. 2015. Vol. 34. Iss. 5. P. 54–63. <https://doi.org/10.1134/S1819714015050024>. EDN: VAFJYP.
10. 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.
11. Паршин А.В., Абрамова В.А., Мельников В.А., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е. Перспективы благородной редкометаллической оруденности нижнепротерозойских отложений на территории Байкальской горной области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 53–59. EDN: PYAKEB.
12. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Модин И.Н., Ялов Т.В. Различия результатов гальванических и индуктивных методов, новые примеры для ДИП и БИЭП // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 104–107. EDN: QLIKJP.
13. Груздев Р.В. Опытные работы методом бесконтактных измерений электрического поля (БИЭП) в модификации зондирования на дренажной системе водохранилища // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: сб. статей. (г. Чита, 27–30 ноября 2017 года). Чита: Изд-во Забайкальского государственного университета, 2017. С. 34–41. EDN: YLXYHA.
14. Модин И.Н., Груздев А.И., Скобелев А.Д. Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 46–53. EDN: VZLQAL.



References

1. Nakhabtsev A.S., Sapozhnikov B.G., Yabluchansky A.I. *Electrical profiling with ungrounded working lines*. Leningrad: Nedra; 1985, 96 p. (In Russ.).
2. Skorokhodov L.M., Starovoitov V.N., Yakupov V.S. Using inductive method in winter conditions. In: Evangulov B.B., Anikeev N.P., Vas'kovskii A.P. (eds.). *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-vostoka SSSR: sb. statei = Materials on Geology and Minerals of the Northeast of the USSR: collected articles*. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1958, iss. 13, p. 150-155. (In Russ.).
3. Yakupov V.S. Method of current density vertical component. *Uchenye zapiski LGU*. 1960;12:59-62. (In Russ.).
4. Yakupov V.S. On the theory of the current density vertical component method. In: I.A. Nekrasov (ed.). *Geokriologicheskie issledovaniya: sb. statei = Geocryological studies: a collection of articles*. Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1971, p. 200-206. (In Russ.).
5. Bobachev A.A. Features of the electric field in the air during low-frequency contactless electrical soundings. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2002;10:36-40. (In Russ.).
6. Gruzdev A.I., Bobachev A.A. Application features of contactless measurements in the resistivity method. In: *Inzhenernaya, ugol'naya i rudnaya geofizika-2015. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. tr. konf. = Engineering, coal and ore geophysics-2015. Current state and development prospects: a collection of conference works*. 28 September – 02 October 2015, Sochi. Moscow: Mezhhregional'naya obshchestvennaya organizatsiya Evro-Aziatskoe geofizicheskoe obshchestvo; 2015, p. 178-183. (In Russ.). EDN: UMRFSR.
7. Gruzdev A.I. Comparison of different methods of contact and non-contact measurements in the midland of Russia. *Engineering surveys*. 2014;9-10:32-37. (In Russ.). EDN: TEGEUV.
8. 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.
9. Budyak A.E., Parshin A.V., Spiridonov A.M., Volkova M.G., Bryukhanova N.N., Bryansky N.V., et al. New results of geochemical and geophysical research of the Hadatkandsky fault zone (North Transbaikalian region). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2015;34(5):54-63. <https://doi.org/10.1134/S1819714015050024>. EDN: VAFJYP.
10. 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. *Geography and Natural Resources*. 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.
11. Parshin A.V., Abramova V.A., Melnikov V.A., Razvozhzaeva E.A., Budyak A.E. Prospects of noble and rare metal mineralization in Lower Proterozoic sediments of Baikal Mountain region. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;3:53-59. (In Russ.). EDN: PYAKEB.
12. Shevnin V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Yalov T.V. Difference in galvanic and inductive methods 'results, new examples for dipole induction profiling and contactless measurements of electric field. *Journal of Mining Institute*. 2013;200:104-107. (In Russ.). EDN: QLIKJP.
13. Gruzdev R.V. Experimental work by the method of contactless measurements of electric field (CMEF) in modification of sensing on reservoir drainage system. In: *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov: sb. statei = Kulagin Readings: Equipment and Technology of Production Processes: collected articles*. 27–30 November 2017, Chita. Chita: Transbaikalian State University; 2017, p. 34-41. (In Russ.). EDN: YLXYHA.
14. Modin I.N., Gruzdev A.I., Skobelev A.D. Comparison of contactless electrical exploration systems. *Engineering surveys*. 2016;2:46-53. (In Russ.). EDN: VZLQAL.

Информация об авторах / Information about the authors



Трофимов Илья Владимирович,

инженер-исследователь,
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,

Research-Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ itrofimov@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>

**Башкеев Аюр Саянович,**

младший научный сотрудник департамента геофизики,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
abashkeev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

Aiyur S. Bashkeev,

Junior Researcher of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
abashkeev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

**Савченко Валентин Андреевич,**

инженер-исследователь,
Институт «Сибирская школа Геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
инженер-исследователь,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>

Valentin A. Savchenko,

Research-Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Research-Engineer,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Irkutsk, Russia,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-4915-1051>

**Коншин Игорь Олегович,**

инженер департамента геоинформатики,
Институт «Сибирская школа Геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0006-5967-1281>

Igor O. Konshin,

Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0006-5967-1281>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Трофимов – подготовка статьи, обработка электроразведочных данных по участку № 2.

А.С. Башкеев – обработка электроразведочных данных по участку № 1.

В.А. Савченко – описание геологии.

И.О. Коншин – описание магниторазведки при помощи беспилотных летательных аппаратов.

Ilya V. Trofimov prepared the article for publication, processed electrical exploration data on the site no. 2.

Aiyur S. Bashkeev processed electrical exploration data on the site no. 1.

Valentin A. Savchenko provided geology description.

Igor O. Konshin described unmanned aerial vehicle magnetic exploration.



Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 11.08.2024; одобрена после рецензирования 21.08.2024; принята к публикации 02.09.2024.

The article was submitted 11.08.2024; approved after reviewing 21.08.2024; accepted for publication 02.09.2024.