



Оригинальная статья / Original article
УДК 55(0.8.055+3.062)

Комплексная аэрогеофизическая съемка при поисках медно-никелевых объектов на Дальнем Востоке

© М.Г. Пустозеров^а

^аЗАО «Аэрогеофизическая разведка», г. Новосибирск, Россия

Резюме: Целью данной статьи является демонстрация возможностей современной аэрогеофизической съемки при поисках промышленно значимых объектов медно-никелевого оруденения различных типов на Дальнем Востоке России. Успешному решению поставленной задачи способствовали использование инновационных технологий съемки и определенные физико-геологические модели оруденения. Комплекс геофизических методов включал магниторазведку, гамма-спектрометрию и зондирование становлением поля. Особенностью комплекса является электроразведочная технология, позволяющая выделять электрические неоднородности размером в несколько десятков метров на глубине в первые сотни метров. Съемка выполнена в масштабе 1:25000 на территории со сложным геологическим строением, где преобладающими являются древние (архейские) породы. Геофизические поля характеризуются чрезвычайно сложным строением, обусловленным продолжительной геологической историей при ярко выраженных тектонических процессах и многообразном магматизме. Для объективной интерпретации и локализации поисковых объектов осуществлен статистический анализ геофизических данных различными способами и выполнена количественная интерпретация магнитного и электрометрического полей в формате 1-3D. По совокупности полученной информации произведено объемное геологическое картирование до глубины 300 м и локализованы рудные объекты различных типов. На площади выделено восемь структурно-вещественных комплексов, включая рудовмещающие основные-ультраосновные и гипербазитовые образования. Отмеченные комплексы формируют два крупных тектонических блока с разной металлогенической обстановкой, обусловленной крупной глубинной интрузией основного состава – источника медно-никелевого оруденения. Разрывные нарушения образуют три системы с резко отличающимися элементами залегания – дорудную, синрудную (рудоконтролирующую) и пострудную. Территория характеризуется широким развитием минерализованных зон разного генезиса и параметров. По специфическим геолого-геофизическим показателям обособлено два рудоконтролирующих комплекса медно-никелевого оруденения – первого (типичного) и второго (метасоматического) типов. Особого рода рудные объекты могут располагаться в отложениях кор выветривания. Собственно рудные объекты локализованы на основе физико-геологических моделей – ассоциации рудоконтролирующих образований со специфическими геофизическими характеристиками. Всего выделено двенадцать перспективных участков, из которых четыре отнесены к первоочередным.

Ключевые слова: комплексная аэрогеофизическая съемка, зондирование становлением поля, сульфидное медно-никелевое оруденение, поисковые факторы

Информация о статье: Дата поступления 23 мая 2019 г.; дата принятия к печати 30 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Пустозеров М.Г. Комплексная аэрогеофизическая съемка при поисках медно-никелевых объектов на Дальнем Востоке. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 287–302.

Integrated aerogeophysical survey in prospecting for copper-nickel deposits in the Far East of Russia

© Maksim G. Pustozеров^а

^аCJSC “Aerogeophysical survey”, Novosibirsk, Russia

Abstract: The study aims to demonstrate the capabilities of the modern aerogeophysical survey in prospecting for commercially promising copper-nickel mineralization objects of different types in the Far East of Russia. To realize the aim, innovation survey technologies and physical-geological models of mineralization are used. The set of geophysical methods includes a magnetic survey, gamma-ray spectrometry, and TEM sounding. The key feature of the above set is an electric survey technology that allows registering electrical inhomogeneities of several tens of meters at a depth of the first hundreds of meters. The survey has been conducted on a scale of 1:25 000, for an area of a complex geological structure with prevailing ancient (Archean) rocks. The extremely complex structure of



the geophysical fields is a result of the long geological history with pronounced tectonic processes and diverse magmatism. For objective interpretation and localization of the explored objects, different methods of the statistical analysis of the geophysical data are applied, and quantitative interpretation of the magnetic and electrometric fields in the 1-3D format is performed. Based on the obtained aggregate information, volumetric geological mapping has been conducted (up to a 300 m depth), and ore objects of different types have been localized. Eight structure-substance complexes, including ore-bearing basic-ultrabasic and hyperbasic formations, have been distinguished in the study area. The above complexes form two large tectonic blocks with different metallogenic conditions due to the massive intrusion of the main composition, i.e. the source of copper-nickel mineralization. The faults form three systems with markedly different occurrence elements, i.e. pre-ore, syn-mineral (ore controlling) and post-ore. The area is characterized by widely developed mineralized zones of different genesis. Based on the specific geological and geophysical indicators, two ore-controlling complexes of copper-nickel mineralization have been distinguished, i.e. the first type (typical) and the second type (metasomatic). Based on the physical and geological models, ore objects per se have been localized, i.e. associations of ore-controlling formations with specific geophysical characteristics. In total, 12 promising sites have been localized, of which four have been defined as priority ones.

Keywords: integrated aerogeophysical survey, TEM sounding, sulfide copper-nickel mineralization, survey factors

Information about the article: Received May 23, 2019; accepted for publication August 30, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Pustozеров М.Г. Integrated aerogeophysical survey in prospecting for copper-nickel deposits in the Far East of Russia. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):287–302. (In Russ.)

Введение

В последние годы вследствие технологических прорывов в аппаратурной и методологической областях существенно повысилась эффективность комплексной аэрогеофизической съемки (КАГС) при поисках рудных объектов различных полезных ископаемых. Особенно это касается электроразведочного канала, позволяющего скачкообразно увеличить объем полезной информации при поисковых работах. Аэроэлектроразведка методом зондирования становлением поля – итог многолетнего сотрудничества в области инновационных технологий АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», ООО «Геофизическое предприятие «Сибгеотех» и ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» – отличается высокой глубиной исследований (до 500 м) при разрешении в первые десятки метров [1–3].

Другой важной составляющей высокой эффективности КАГС является накопление знаний, выразившееся в разработке корректных и апробированных

на многих десятках месторождений физико-геологических моделей поисковых объектов [4–6].

В качестве примера успешного использования КАГС приводятся результаты работ на одной из площадей (500 км²) на Дальнем Востоке, перспективной на выявление промышленно значимых медно-никелевых месторождений.

В геологическом строении района исследований принимают участие широко распространенные архейские образования, представленные глубоко метаморфизированными гнейсами, сланцами, кварцитами, амфиболитами, а также юрские (туфы, риолиты, алевриты, песчаники, конгломераты), неогеновые (пески, глины, галечники) и четвертичные отложения различного состава¹⁻³. Интрузивные образования занимают до 30 % площади съемки и представлены несколькими комплексами: позднеархейским (лейкограниты, гранодиориты), протерозойским (гранитоиды), позднепалеозойским (гранодиориты, граниты, кварцевые диориты), раннемеловым (рудоносные мелкие массивы, дайки основного

¹ Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Становая. N-52-XIV. М.: Недра, 1965.

² Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Становая. N-52-XIII. М.: Недра, 1967.

³ Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). N-52-Зей. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007.



и ультраосновного состава). В региональном плане район работ расположен в пределах Станового террейна (складчато-глыбовой области) на стыке Дамбукинского нижнеархейского и Иликанского верхнеархейского метаморфических блоков, что определило широкое развитие разрывной тектоники различной иерархии и элементов залегания. Формирование раннемелового рудоносного кортландит-пироксенит-габбрового комплекса происходило синхронно с магматическими породами Станового вулканоплутонического пояса в результате коллизии Сибирского кратона и Амурского террейна. Заключительным этапом тектонического развития явились кайнозойские впадины, заполненные неогеновыми и четвертичными отложениями.

Главными полезными ископаемыми на площади считаются медно-никелевые руды. Выявлено несколько рудопроявлений, которые при дальнейшем изучении предполагается перевести в разряд промышленно значимых месторождений магнетита [7]. Генетически руды связываются с раннемеловым комплексом малых интрузий основного-ультраосновного состава. Медно-никелевое оруденение подразделено на три типа: вкрапленные руды в магматических породах преимущественно ультраосновного состава (пироксениты, кортландиты, горблендиты), сплошные (массивные) руды в тектонических зонах, прожилково-вкрапленные руды в экзоконтактах магматических пород. Типичный состав руд по мере убывания представлен рядом «пирротин (доминирующий) – халькопирит – пентландит – магнетит» [8].

Методы исследований

КАГС, включающая магниторазведку, гамма-спектрометрию и электро-разведку становлением поля, выполнена в масштабе 1:25000 на площади 500 км². Характерной особенностью комплекса является электроразведочный канал с глубиной изучения до 500 м. Разрешение данного метода позволяет выявить электрические неоднородности размером в

несколько десятков метров на глубине в первые сотни метров. Аппаратурный комплекс состоит из внешней платформы с радиусом 10 м и бортового регистрирующего блока. Платформа представляет собой полигональный секционный каркас из композиционных материалов. Вокруг каркаса крепится кабель генераторного контура. Прием полезного сигнала осуществляется датчиком, размещенным в центре платформы (соосная приемно-генераторная схема). Зафиксированный сигнал через антенный усилитель поступает по трос-кабелю на борт вертолета для регистрации бортовой аппаратурой. Технология не имеет аналогов в стране и сопоставима по своим возможностям с лучшими зарубежными образцами. Аппаратурно-методический комплекс «Импульс-А5» разработан и внедрен в практику ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» (Россия) совместно с АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», ООО «Геофизическое предприятие «Сибгеотех»» (Россия). Магниторазведка осуществлена с использованием магнитометра CS-3 (Scintrex LTD, Канада). При проведении гамма-спектрометрии использовались наиболее совершенные цифровые гамма-спектрометры RSX-4 и RSX-5 серии RS-500 на основе сцинтилляционных детекторов (Radiation Solutions Inc., Канада).

КАГС выполнена по серии параллельных маршрутов в меридиональном направлении, вкрест основному простиранию структур. Съёмка произведена с огибанием генеральных форм рельефа на средней высоте 100 м при скорости 100 км/ч. При этом спад электродвижущей силы фиксировался на высоте 50 м, модуль вектора магнитной индукции – на 75 м, а гамма-спектрометрических характеристик – на 100 м. Плановая привязка маршрутов выполнена спутниковой навигационной системой (GPS), обеспечивающей точность определения координат ± 10 м.

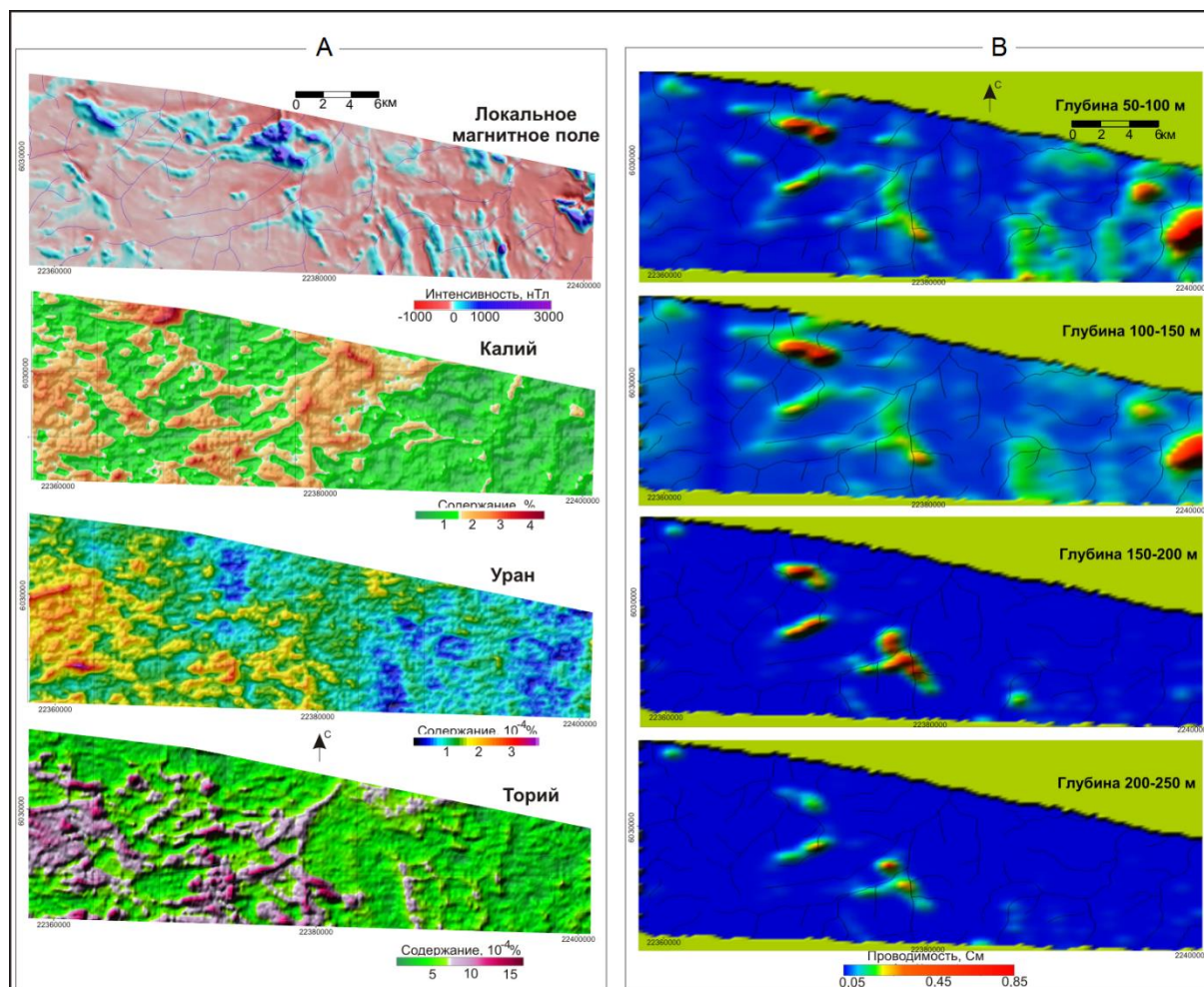


Результаты исследований

Интерпретация данных производилась в следующей последовательности: качественный анализ, статистическая обработка, количественные расчеты, комплексная интерпретация.

Аномальное магнитное поле характеризуется чрезвычайно сложным строением с изменением интенсивности от минус 730 до 3430 нТл (рис. 1). Наиболее крупная аномальная зона субширотного простирания, сформированная разнообразными по морфологии и интенсивности максимумами, расположена на северо-западе и севере площади. Вторая

обширная зона находится на юго-востоке, центре площади, а на крайнем востоке – третья. Природа большей части магнитных аномалий связана с интрузиями основного-ультраосновного состава раннемелового комплекса, в меньшей степени – с контактово-измененными породами, а также с амфиболитами и железистыми кварцитами^{4,5} [9]. По результатам 3D-инверсии, выполненной в приложении пакета Coscad-3D (МГГУ, Россия), большей частью аномалиеобразующие объекты распространены до глубины 500 и более метров (рис. 2).



**Рис. 1. Исходные геофизические поля (А)
и распределение проводимости на глубине по данным 1D-инверсии (В)
Fig.1. Initial geophysical fields (A)
and at-depth distribution of conductivity based on 1D-inversion (B)**

⁴ Физические свойства горных пород и руд. Справочник геофизика / ред Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 453 с.

⁵ Дортман Н.Б. Петрофизика: справочник. Горные породы и полезные ископаемые. М.: Недра, 1992. 391 с.

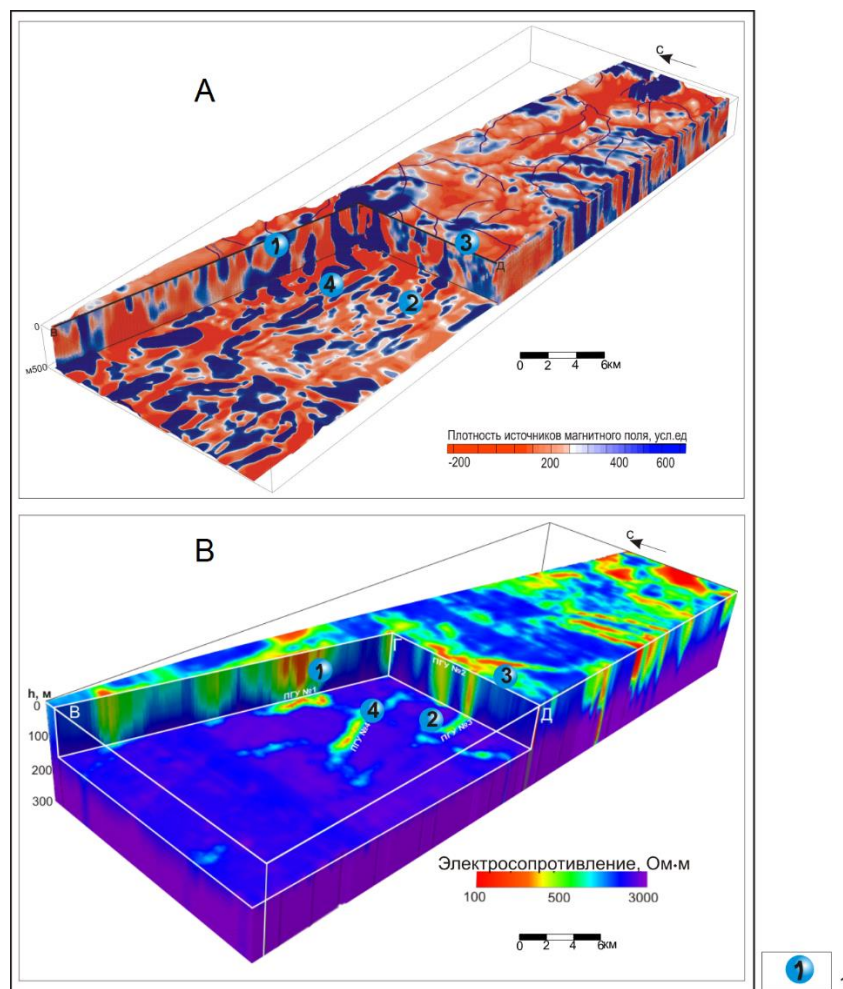


Рис. 2. Результаты количественной интерпретации магнитного (А) и электрометрического (В) полей:

1 – номера перспективных геофизических участков первой очереди

Fig. 2. Quantitative interpretation results for magnetic (A) and electrometric (B) fields

1 – numbers of the promising geophysical sites, first priority

Содержания естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) характеризуются рядом специфических особенностей. В целом концентрации отличаются пониженным уровнем, обусловленным древним возрастом пород, участвующих в геологическом строении площади. Общие вариации содержаний ЕРЭ по площади следующие: калий – 0,1–4 %, уран – $(0,2–3,6) \cdot 10^{-4}$ %, торий – $(0,5–16) \cdot 10^{-4}$ %. Наиболее низкие величины наблюдаются в восточной трети площади, что объясняется повышенной мощностью рыхлых образований. На этом фоне выделяются аномальные зоны повышенных значений, контролируемые интрузии кислого состава. Одна из

таких зон расположена на севере, другая находится в центре. Схожая по интенсивности аномальная зона прослежена на западе площади. Зона характеризуется близкой к дугообразной формой с выпуклостью на юг. Природа ее связывается с гранитизацией нижнеархейских отложений. Ореолы аномально низких содержаний соответствуют полям развития основных-ультраосновных интрузий металлоносного раннемелового комплекса. В долинах современных водотоков наблюдается как аккумуляция природных изотопов, так и, хотя и в меньшей степени, вынос. Концентрации природных изотопов в долинах достигают предельных величин. Мощность экспозиционной дозы



характеризуется аналогичным распределением при вариациях 0,2–31 мкР/ч.

Электрометрическая характеристика приводится по распределению средневзвешенной проводимости в интервалах определенных глубин, оцененных по данным 1D-инверсии (программа *lfstem*, ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», Россия).

Суммарная проводимость верхней части разреза в интервале глубин 50–100 м распределена довольно сложным образом (см. рис. 1). Общие изменения заключены в пределы 0,04–0,75 См (сопротивление – 70–2900 Ом·м). Максимумы проводимости, представляющие наибольший поисковый интерес, формируют несколько аномальных зон. Наибольшая по размерам – пространственно совмещена с магнитной аномальной зоной и расположена на северо-западе площади. В пределах зоны зафиксировано четыре сближенных максимума, разнообразных по размерам и форме. Южнее находится другая аномальная зона дугообразных очертаний выпуклостью на юг. К юго-востоку от нее, в центре площади расположена аномальная область, представленная линейными максимумами с различной ориентировкой. Еще далее на юго-восток закартирована зона, сформированная сближенными линейными максимумами субмеридионального простирания. Природа охарактеризованных аномальных зон большей частью обусловлена комплексом факторов: скоплением сульфидов, развитием кор выветривания, интенсивной трещиноватостью, графитизацией, приконтактной минерализацией. Аномальная зона, расположенная на крайнем востоке, состоит из двух обширных максимумов сложной формы, приближающейся к изометричной. Предельно низкие величины связываются с неоген-четвертичными глинами, заполняющими наложенные тектонические впадины. Об этом свидетельствует ограниченная мощность низкоомного горизонта (около 100–200 м). На более глубинных горизонтах зоны проводимости,

вызванные преимущественно скоплениями сульфидов, претерпевают незначительные изменения, что указывает на значительный размах сульфидизации (руденения). Максимумы, связанные с глинистыми образованиями, на глубине 150–200 м практически отсутствуют.

Известные рудные объекты (рудные участки) тяготеют к локальным максимумам проводимости (минимумам сопротивлений), связанным с сульфидизацией, аномалиям магнитного поля и ореолам пониженных концентраций ЕРЭ, контролирующих преимущественно малые интрузии основного-ультраосновного состава. О характеристиках потенциальных рудных объектов (контрастных проводников) в нижнем полупространстве можно судить по блок-диаграмме, представленной на рис. 2.

Сложные распределения геофизических и радиохимических параметров обусловили необходимость использования статистического анализа различными способами для установления «геофизических» образов рудных объектов и выявления поисковых факторов, контролирующих руденение. Наиболее информативными параметрами, задействованными в статистической обработке, явились величины аномального магнитного поля, сопротивления на глубине 200 м и мощность экспозиционной дозы. Статистические расчеты выполнены в приложениях пакета *Coscad-3D*.

В результате статистической обработки методом динамических сгущений (К-средних) выделено восемь классов, характеризующихся специфическими геофизическими показателями и отвечающих определенным геологическим образованиям (рис. 3).

Класс 2 отнесен к «рудному» вследствие аномально высокого уровня магнитного поля при резко сниженных сопротивлениях и радиоактивности (соответственно 427 нТл, 1820 Ом·м, 7,9 мкР/ч). На его основе выделен рудоконтролирующий комплекс (РКК) первого типа, локализованный на северо-западе и юго-востоке



площади. Класс 6 также представляется «рудным» с предположительно широким развитием радиоактивных метасомати-

тов (355 нТл, 1600 Ом·м, 13,2 мкР/ч). Он является аналогом РКК второго типа, зафиксированным в центре территории.

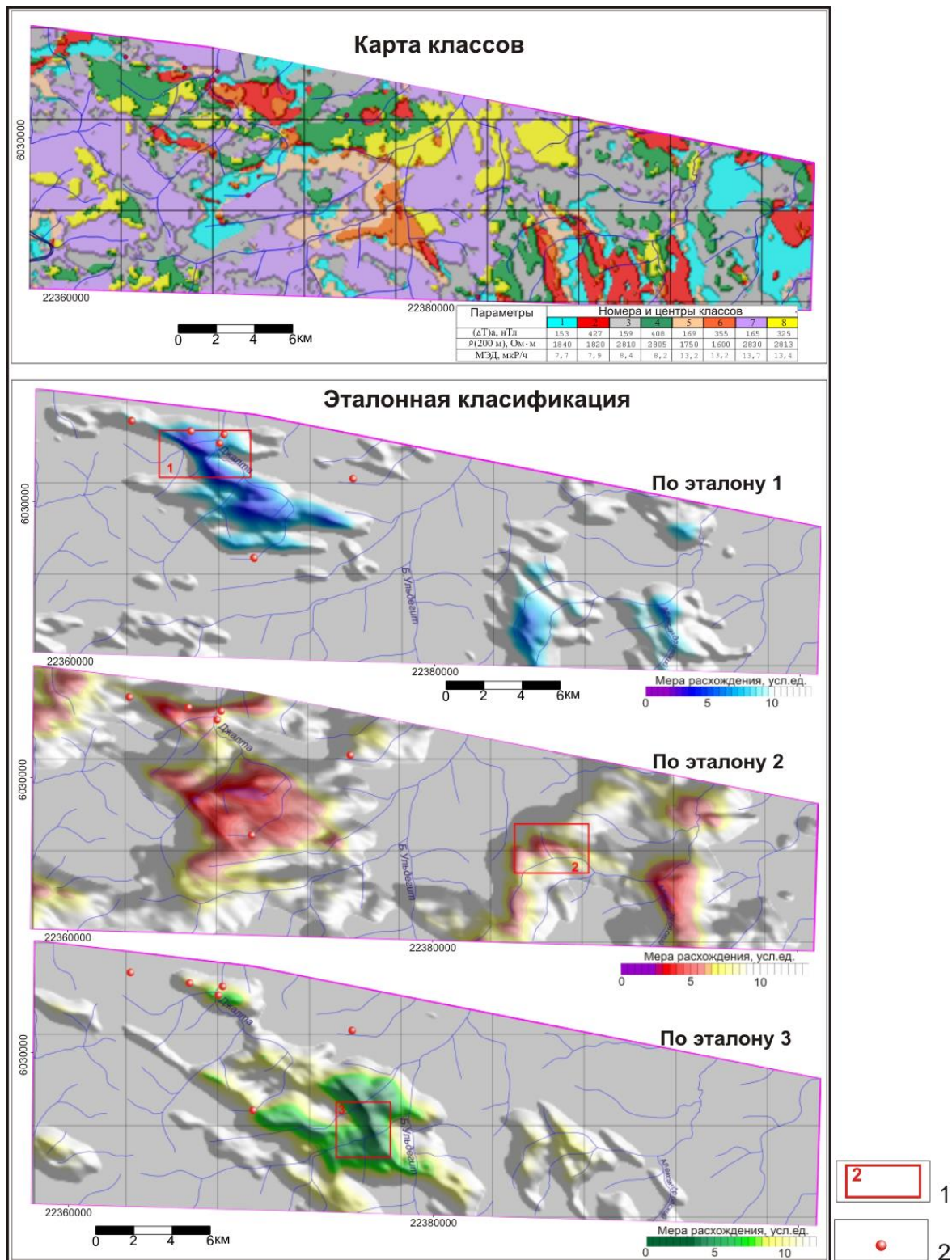


Рис. 3. Результаты статистической обработки способами K-средних и эталонной классификации:
1 – эталонные участки и их номера; 2 – известные медно-никелевые рудопроявления
Fig. 3. Statistical processing results by K-means and reference classification:
1 – reference sites and their numbers; 2 – known copper-nickel ore occurrences



По результатам эталонной классификации предпринята попытка выделения собственно рудных объектов (зон). В качестве эталона 1 выбран рудный участок, включающий три рудопоявления с содержанием никеля более 1 %. Области наибольшего соответствия эталону обозначились на северо-западе и юго-востоке площади, где хорошо согласуются с «рудным» классом 2. Анализ при использовании эталона 2, расположенного в пределах известного рудного участка на юго-востоке, в общем выявил похожую картину, что свидетельствует о сходстве обоих эталонов. Области минимальных расхождений с искомыми образами расположены там же. Данные итогов статистической обработки на основе эталона 3, охватывающего участок в центре площади, установили несколько иную ситуацию. Наибольшая по размерам область, соответствующая искомому объекту, расположена в непосредственной близости от эталона. Значительно меньшая по параметрам – приходится на северо-запад. Последнее, вероятно, свидетельствует о «смешанном» типе оруденения, естественно, в формате статистических образов.

Представляется, что использование результатов эталонной классификации при поисковых работах должно быть взвешенным и не подменять собой всю остальную исходную информацию. Вытекает это из известного тезиса «каждое месторождение уникально». Отсюда поисковый интерес представляют не конкретные геофизические параметры месторождений, а типичные ситуации (обстановки), характеризующие рудный процесс в целом.

По совокупности полученной информации на изученной площади выделено восемь структурно-вещественных комплексов (СВК) (рис. 4). Процедура обособления СВК основана на комплексном районировании имеющихся геофизических и радиохимических полей, их производных, а также на результатах статистического анализа. Последнее рассма-

тривается как «количественное» районирование полей.

Наиболее распространенный СВК-1 обособлен по «фоновым» значениям геофизических и радиохимических параметров. Представлен СВК нерасчлененными интенсивно метаморфизованными гнейсами, кристаллическими сланцами, а также плагиогранитами, гранитами позднеархейского комплекса. Столь широкий ряд пород, формирующих СВК, объясняется длительной геологической историей развития, глубоким метаморфизмом, в результате которого физические свойства перечисленных образований были существенно нивелированы.

СВК-2 соотнесен с теми же породами, но претерпевшими интенсивную гранитизацию. Комплекс выделен по «фоновым» геофизическим полям и значимому повышению содержаний природных изотопов и общей радиоактивности. Рассматриваемые образования распространены в центре и на юге западной половины площади. Они формируют обширные области сложной формы с выраженной «дугообразностью».

СВК-3 отождествлен с гранитами протерозойского комплекса. Выделен он по «классическому» сочетанию полей: низким величинам магнитного поля, высоким электросопротивлениям (низкой проводимости), аномально высоким содержаниям калия, повышенным концентрациям урана и низким – тория, высокой радиоактивности. Зафиксирован комплекс у северо-западной границы съемки.

СВК-4 контролирует гранитную составляющую палеозойского комплекса. Для него характерны несколько повышенный уровень магнитного поля, высокие сопротивления, повышенные содержания калия, урана, тория и высокий уровень гамма-излучения. Расположены описанные образования на севере площади.

СВК-5 является аналогом гранодиорит-диоритовой составляющей вышеописанного магматического комплекса.

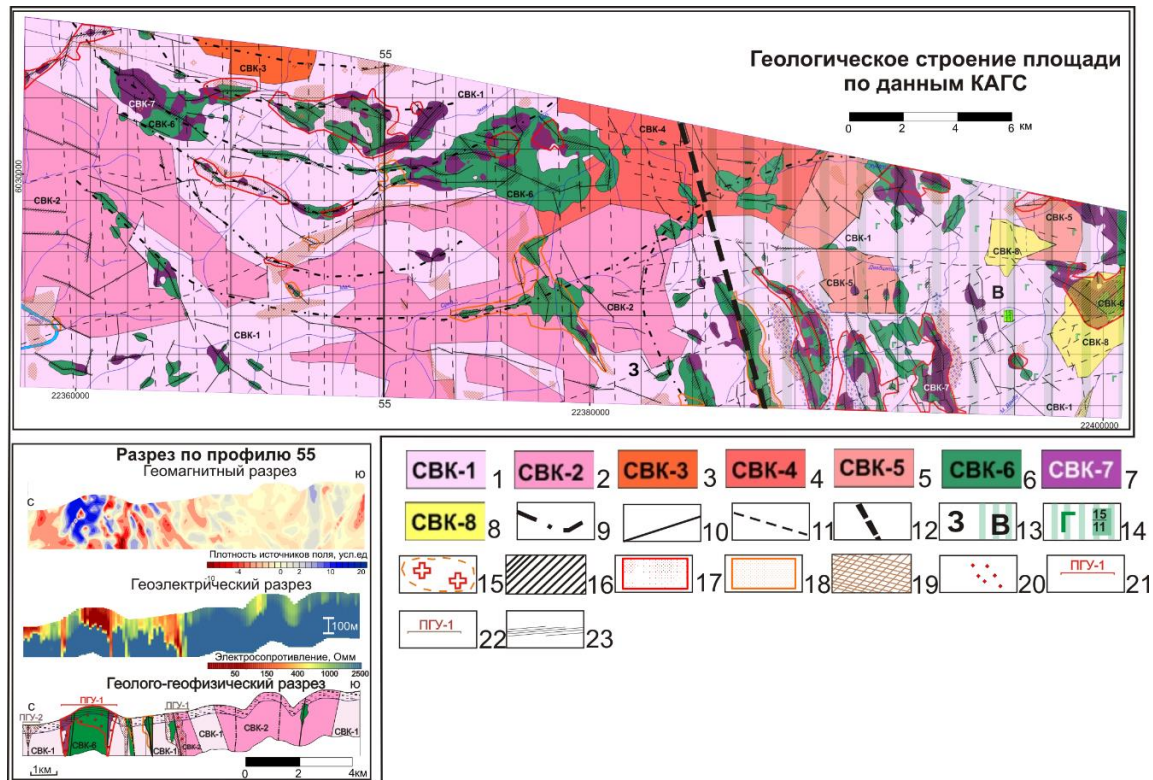


Рис. 4. Результаты аэрогеофизических исследований:

1–8 – структурно-вещественные комплексы: 1 – нерасчлененные архейские образования, 2 – гранитизированные архейские породы, 3 – протерозойские гранитоиды позднестанового комплекса, 4 – палеозойские граниты худачинского комплекса, 5 – палеозойские диориты худачинского комплекса, 6 – меловые основные-ультраосновные породы джалтинского комплекса, 7 – меловые ультраосновные образования джалтинского комплекса, 8 – неоген-четвертичные глины, пески, галечники; 9–12 – системы разрывных нарушений: 9 – первая, протерозойская, дорудная (дугообразные (кольцевые) разломы), 10 – вторая, меловая (магмоподводящие разрывы (в пределах рудоконтролирующего комплекса – рудоконтролирующие)), 11 – третья, кайнозойская, пострудная (разнонаправленные разрывные нарушения), 12 – глубокий, коровой разлом мелового заложения; 13 – наиболее крупные тектонические блоки: 3 – Западный, В – Восточный с базитовым плутоном; 14 – глубинная интрузия основного состава, рудогенерирующий источник (в числителе – глубина залегания, в знаменателе – мощность, км); 15 – нескрытые гранитоиды; 16 – приповерхностные магматические тела основного-ультраосновного состава; 17–18 – рудоконтролирующие комплексы сульфидного медно-никелевого оруденения: 17 – первого типа (основные-ультраосновные интрузии, сульфиды, зоны дробления, частично метасоматиты), 18 – второго типа (основные-ультраосновные интрузии, сульфиды, метасоматиты, зоны дробления); 19 – предполагаемые коры выветривания; 20 – концентрированная сульфидизация; 21 – интервалы перспективных геофизических участков первого типа оруденения; 22 – рудоконтролирующие комплексы кор выветривания; 23 – экзогенная трещиноватость

Fig. 4. Results of the aerogeophysical studies:

1–8 – structure-substance complexes: 1 – undifferentiated Archean formations, 2 – granitization of Archean rocks, 3 – Proterozoic granitoids, late Stan complex, 4 – Paleozoic granites, Hudachinsky complex, 5 – Paleozoic diorites, Hudachinsky complex, 6 – Cretaceous basic-ultrabasic rocks, Jaltinsky complex, 7 – Cretaceous ultramafic formations, Jaltinsky complex, 8 – Neogene-Quaternary clay, sand, pebble; 9–12 – faulting systems: 9 – the first system, Proterozoic, pre-ore (Arcuate (ring) faults), 10 – the second system, Cretaceous (Magma-delivering faults (within the OCC, ore-controlling)), 11 – the third system, Cenozoic, post-ore (Divergent faults), 12 – deep rift, Cretaceous occurrence; 13 – the largest tectonic blocks: W – Western, E – Eastern, mafic pluton; 14 – in-depth intrusion of the basic composition, ore-generating source (the numerator indicates the depth, the denominator, thickness, km); 15 – sealed granitoids; 16 – near-surface magmatic bodies, basic-ultrabasic composition; 17–18 – ore-controlling complexes, sulfide copper-nickel mineralization: 17 – first type (basic-ultrabasic intrusion, sulfides, crush zones, in part, metasomatic rocks), 18 – second type (basic-ultrabasic intrusion, sulfides, metasomatic rocks, crush zones); 19 – estimated weathering crust; 20 – concentrated sulphidation; 21 – intervals of promising geophysical sites, the first type of mineralization; 22 – same, weathering crusts ore-controlling complexes; 23 – exogenous fractures



Соответственно, он обособлен по тому же уровню магнитного поля, несколько сниженным электросопротивлениям, пониженным концентрациям природных изотопов и радиоактивности. СВК-5 представлен двумя массивами сложной формы на севере восточной половины съемки.

СВК-6 выделен по аномально высоким величинам магнитного поля (основной критерий), зачастую пониженным электросопротивлениям (высокой проводимости), низким величинам гамма-активности, пониженным содержаниям калия, урана, большей частью низким концентрациям тория. Границы СВК проведены по зонам максимальных градиентов магнитного поля. Комплекс, как это следует из физико-радиохимической характеристики, соотнесен с нерасчлененными базит-ультрабазитовыми интрузиями мелового комплекса. Эти образования проявлены в виде многочисленных относительно небольших тел сложной формы, распространенных на значительной части площади. Некоторые интрузии обнажаются на поверхности, однако значительная часть залегает на глубине (до 500 и более метров). В целом разрозненные приповерхностные магматические тела имеют общие глубинные корни. Параметры основных-ультраосновных тел не выдержаны и изменяются от первых сотен метров до 3,5×8 км. Наибольшая плотность основных-ультраосновных тел зафиксирована на севере площади, где наблюдается их субширотное простираание, и в центре, где они ориентированы в северо-западном и север-северо-западном направлении. СВК-6 считается одним из рудовмещающих образований.

СВК-7 объединяет гипербазитовые интрузии мелового комплекса. Вычленен он по зонам с аномально низкими радиоактивностью и содержаниями ЕРЭ, зафиксированными в пределах СВК-6. Размеры предполагаемых тел ультраосновного состава также не выдержаны и варьируют от первых сотен метров до первых километров. СВК-7 рассматривается в

качестве основного рудовмещающего комплекса.

СВК-8 отвечает пескам, глинам, галечникам неоген-четвертичного возраста. Выделен он по низким электросопротивлениям (высокой проводимости), обусловленным тонкодисперсной составляющей нелитифицированных пород. С глубиной сопротивление резко возрастает, что связано с относительно ограниченной мощностью рыхлых образований. Кроме того, СВК-8 характеризуется низким уровнем гамма-активности и пониженными концентрациями калия при наличии выраженных ореолов урана и тория. Представлен СВК двумя наложенными впадинами на востоке площади, по форме близкой к изометричной. Мощность рыхлых образований достигает 100–150 м.

Контакты между отмеченными СВК большей частью тектонические.

На исследованной площади интенсивно проявлена дизъюнктивная тектоника, обусловившая выраженное блоковое строение. Выделено два наиболее крупных тектонических блока – Западный, занимающий 2/3 территории съемки, и Восточный. Формально Восточный блок отличается от Западного значимым снижением концентраций ЕРЭ и общей радиоактивности, пониженными электросопротивлениями на малых глубинах, другим генеральным простираанием магнитных максимумов, а также высокими величинами поля силы тяжести (данные предшествующих работ). В рельефе ему соответствуют отрицательные морфоэлементы (наложенные впадины).

Приведенные закономерности связаны со становлением глубинного плутона основного состава, развитого в низах блока Восточного и контрастно проявленного в гравитационном поле. Его расчетная плотность по данным 2D-моделирования (приложение пакета MontajOasis) составляет 2,89 г/см³ и сопоставима с плотностью интрузий мелового комплекса. Глубина залегания верхней



кромки – 15 км, вертикальная мощность – 11 км, горизонтальная – 6 км. Сечение тела – трапециевидное. Центр глубинной интрузии приходится на восточную границу площади. Простираие – северо-западное. В региональном магнитном поле массив контролируется крупными, интенсивными максимумами. Плутон, судя по пространственному положению и физическим свойствам, рассматривается как потенциально рудогенерирующий источник. Блок Восточный подвергнут большей трещиноватости и опущен относительно Западного, что следует из общего развития плутона – внедрение, кристаллизация, проседание надинтрузивной толщи.

Контактируют блоки по тектоническому шву, развитому, вероятно, до подошвы земной коры. Время его активизации соотносится с меловым (синрудным) периодом. Кроме того, на изученной площади выделено три системы разрывных нарушений, влияющих на локализацию оруденения.

Первая система, по времени заложения условно определяемая как дорудная, сформирована дугообразными (кольцевыми) нарушениями. Большая их часть находится в западной половине площади, где они образуют концентрическую ассоциацию выпуклостью на юг при достаточно выдержанном расстоянии между сегментами (около 2 км). Предполагаемый центр расположен севернее площади в пределах гранитов протерозойского комплекса. Очевидно, что развитие раннепротерозойского интрузива (СВК-3) и обусловило столь специфический рисунок. В западном направлении кольцевые дизъюнктивы прослеживаются до границы площади КАГС, а на востоке – «отсекаются» упомянутым глубинным межблоковым разломом. На востоке предположительно выявлена схожая дугообразная структура с выпуклостью на запад. Природа ее может быть увязана со становлением глубинной интрузии. Время заложения, соответственно, относится к меловому периоду. Рассмотренные дизъюнктивы обособ-

лены по цепочечным максимумам аномального и локального магнитного поля. Часть из них контролируется линейными зонами низких электросопротивлений, имеющих существенное распространение на глубину. В распределении природных изотопов и общей радиоактивности дугообразные нарушения находят отражение в виде вытянутых максимумов или минимумов. Хорошо они просматриваются и в современных формах рельефа, что указывает на их перманентную активизацию. Углы падения сместителей – крутые, близкие к вертикальным. Размеры сопровождающих зон дробления вкрест простирания по данным аэроэлектроразведки достигают первых сотен метров.

Вторая система нарушений сформирована укороченными кулисообразно расположенными разрывами различного простирания. На севере площади они имеют генеральную субширотную ориентировку, а на западе и юге – северо-западную, север-северо-западную. Обособлены характеризуемые дизъюнктивы по линейным максимумам магнитного поля базит-ультрабазитовой природы, а также минимумам содержаний ЕРЭ и гамма-активности. Часть из них контролируется линейными зонами низких сопротивлений. В соответствии с природой аномалиеобразующих объектов эти нарушения отнесены к магмоподводящим, вмещающим основные-ультраосновные интрузии. По отношению к дугообразным дизъюнктивам они являются большей частью опережающими и по времени образования – меловыми. Падение углов сместителей – субвертикальное. Обобщенная протяженность магмоподводящих нарушений может достигать 10 км. Те из них, что находятся в пределах рудовмещающих комплексов, рассматриваются как рудоконтролирующие.

Третья система объединяет разрывы различной ориентировки, отнесенные к пострудному этапу тектонической активизации. Последнее следует из их деформирующего влияния на магмопод-



водящие (рудоконтролирующие) дизъюнктивы. Основные простирания нарушений выдержаны в субмеридиональном, субширотном и северо-восточном направлениях. Большая часть разрывов продолжается за пределами съемки, то есть их протяженность явно превышает первые десятки километров. Выделены они по коррелируемому смещению разломов второй системы, а также изменению их простирания. В геофизических и радиохимических полях рассматриваемые нарушения фиксируются торцевыми сочленениями аномалий, незакономерными изменениями их формы, реже непосредственно по линейным ореолам и аномалиям различного знака.

Минерализованные зоны, контролируемые физическими и радиохимическими показателями, широко распространены на площади. Они имеют различные параметры, генезис и проявление.

Зоны пирротинизации, в первом приближении соответствующие интрузиям основного-ультраосновного состава (СВК-6) и собственно ультрабазитам (СВК-7), охарактеризованы выше. Основной аномалиеобразующий компонент – магнитный моноклинный пирротин. Магнитные магматические тела (пирротиновые объекты) приповерхностного залегания контролируются линейными максимумами локального магнитного поля. Фиксируются они, естественно, в непосредственной близости от магмоподводящих разломов.

Зоны углеродсодержащих пород, рассматриваемые преимущественно как «помехи», могут хорошо проявляться в виде линейных минимумов электросопротивлений (максимумов проводимости), так же, как и участки концентрированной сульфидизации (пирротинизации), несущей оруденение. Кроме этого, снижение сопротивлений могут вызвать тонкодисперсные рыхлые породы (глины), интенсивная трещиноватость (швы разломов), ряд других проводящих объектов. По общим сведениям обуглероженность сопровождается увеличе-

нием содержаний урана, что помогает уверенно идентифицировать данную помеху.

Зоны отложений кор выветривания могут выступать в качестве «полезных» объектов, когда они развиваются на рудоносном сульфидном субстрате, и в виде помех в случае иного исходного материала. Маркируются они аномалиями низких сопротивлений и некоторыми косвенными признаками: снижение интенсивности магнитных аномалий, повышенная концентрация ореолов выноса или привноса ЕРЭ.

Зоны метасоматически измененных пород как поисковый фактор в общем случае обособляются локальными повышениями содержаний ЕРЭ и уровня гамма-излучения.

По совокупности данных, включая результаты статистической обработки материалов КАГС, на площади выделено два РКК. РКК-1 характеризуется типичным пакетом факторов, описывающих сульфидное медно-никелевое оруденение [7, 10]. Это наличие основных-ультраосновных и гипербазитовых образований при доминировании последних, концентрированного скопления сульфидов с преобладанием пирротина, метасоматически измененных пород. В физических и радиохимических полях РКК-1 соответствуют комплексные, большей частью пространственно совмещенные аномалии: предельные максимумы магнитного поля, локальные минимумы содержаний ЕРЭ и гамма-излучения и интенсивные минимумы электросопротивлений. Метасоматиты проявляются в виде небольших по размерам и амплитуде максимумов концентраций природных изотопов и радиоактивности на фоне общего снижения содержаний ЕРЭ. Наибольшее распространение РКК-1 получил на севере, северо-западе и юго-востоке площади. Форма и размеры фрагментов РКК-1 разнообразны.

РКК-2 формирует схожий ансамбль рудоконтролирующих объектов, но при повышенных концентрациях природных



изотопов и радиоактивности. Возможно, это связано с более интенсивными метасоматическими процессами. Наиболее развит РКК на юге территории, где закартированы два крупных фрагмента подобного типа. На северо-западе наблюдаются участки развития смешанного типа оруденения, но преобладает все же обстановка, свойственная РКК-1. По степени вероятности выявления промышленно значимого оруденения РКК-1 представляется более перспективным вследствие большей пространственной близости рудоконтролирующих образований и соответствия «классическому» облику.

Особого рода рудоконтролирующие объекты могут располагаться в пределах интенсивного развития кор выветривания на сульфидном субстрате. Выделены они по зонам минимальных электросопротивлений, не сопровождаемым выраженными аномалиями магнитного поля, а также по локальным минимумам или максимумам ЕРЭ и радиоактивности. Такие же сочетания свойственны областям повышенной мощности рыхлых отложений или развития углеродсодержащих (графитизированных) образований. Диагностика таких объектов, как рудоконтролирующие, основана на выявлении реликтов пирротинизированных тел. Расположены они часто вблизи интрузий мелового комплекса. Форма их преимущественно линейная, размеры разнообразны и достигают 0,5×4 км.

Выбор перспективных геофизических участков (ПГУ) осуществлен на основе обобщенной (схематической) физико-геологической модели сульфидного медно-никелевого оруденения [4, 5, 7]. Как ранее упоминалось, на исследованной площади установлено три типа оруденения: вкрапленные руды в магматических породах преимущественно ультраосновного состава (пироксениты, кортландиты, горблендиты), сплошные (массивные) руды в тектонических зонах, прожилково-вкрапленные руды в экзоконтактах магматических пород. Типичный состав руд по мере убывания представлен

пирротинном, халькопиритом, пентландитом, магнетитом. В общем виде отмеченный пакет контролируется аномально высокими значениями магнитного поля, обусловленными моноклинным пирротинном, низкими содержаниями природных изотопов и пониженной радиоактивностью, свойственными породам ультраосновного (частично основного) состава, аномально низкими электросопротивлениями, вызванными скоплениями сульфидов и зонами дезинтеграции. На фоне низких концентраций ЕРЭ вероятны локальные повышения, связанные с метасоматически измененными образованиями. Таким образом, приведенные факторы, имеющие пространственное совмещение и расположенные в пределах выделенных РКК, указывают на рудную зону (ПГУ). Участки, находящиеся на площадях РКК второго рода, характеризуются более контрастными ореолами ЕРЭ и, соответственно, большим развитием метасоматитов. На всех ПГУ предполагается присутствие отложений кор выветривания. Степень дезинтеграции пропорциональна интенсивности максимумов проводимости (минимумов сопротивлений) в верхней части разреза.

По комплексу полученной информации выделено двенадцать перспективных геофизических участков различной очередности заверки: ПГУ-1 – первой очереди (четыре участка) и ПГУ-2 – второй (восемь участков) (рис. 5).

ПГУ-1 № 1 расположен на северо-западе площади в пределах «смешанного» оруденения (РКК-1 и РКК-2 при доминировании первого). Для него характерно наличие всех рудоконтролирующих факторов со следующими геофизическими показателями: амплитуда магнитных аномалий свыше 600 нТл, сопротивления существенно понижаются с глубиной от 200 Ом·м (на 50 м) до 50 Ом·м (на 200 м), суммарная проводимость варьирует с глубиной в пределах 0,45–0,13 См, содержания ЕРЭ и гамма-активности образуют сближенные ореолы и аномалии «полярных» знаков. Концентрации

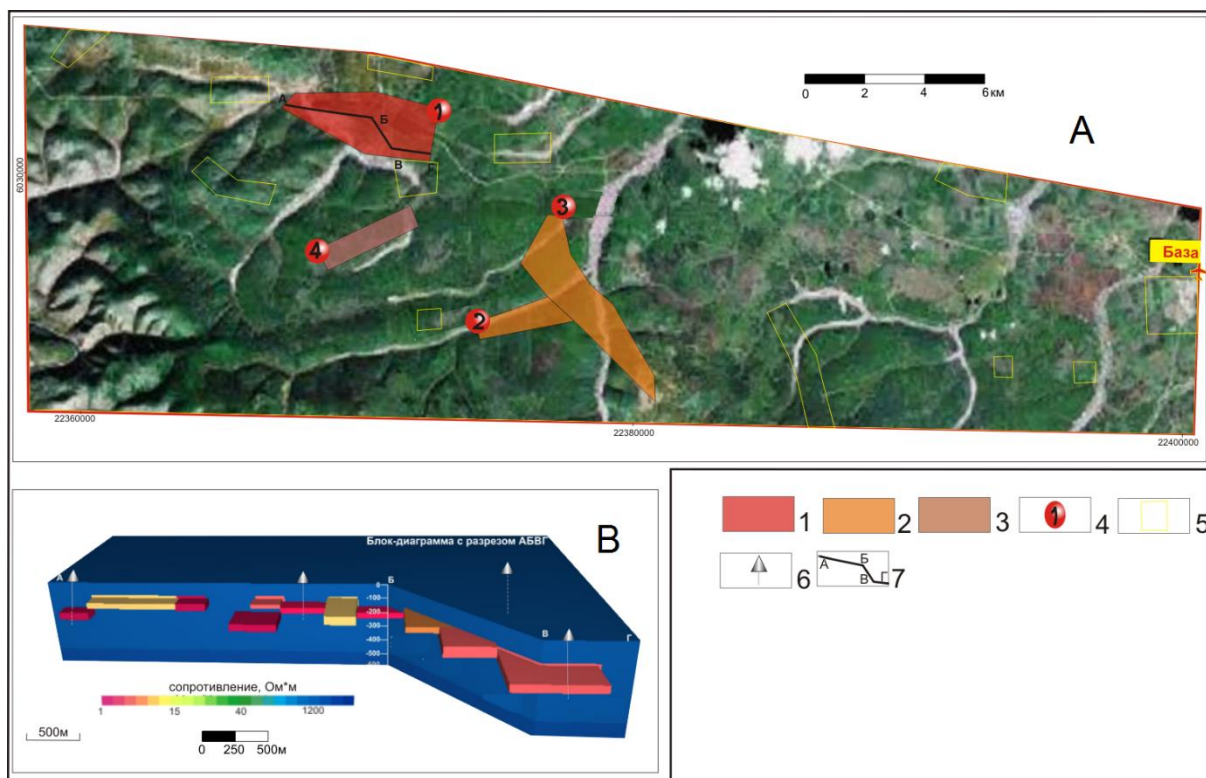


Рис. 5. Расположение перспективных геофизических участков (А) и результаты 3D-инверсии на перспективном геофизическом участке № 1 (В):
 1–4 – перспективные геофизические участки первоочередной заверки (ПГУ-1): 1 – сульфидного медно-никелевого оруденения первого типа, 2 – сульфидного медно-никелевого оруденения второго типа, 3 – оруденение в корах выветривания, 4 – номера ПГУ-1; 5 – перспективные геофизические участки второй очереди заверки (ПГУ-2); 6 – рекомендуемые скважины с целью вскрытия и оценки оруденения; 7 – линия разреза на перспективном геофизическом участке № 1

Fig. 5. Location of the promising geophysical sites (A) and results of 3D-inversion at PGS №1 (B):
 1–4 – promising geophysical site, first-stage certification (PGS-1): 1 – sulfide copper-nickel mineralization, type 1, 2 – same, type 3, 3 – mineralization in the weathering crusts, 4 – numbers of PGS-1; 5 – promising geophysical sites, second-stage certification (PGS-2); 6 – wells recommended for opening and evaluation; 7 – profile line at PGS № 1

соответственно равны: калий – 1,5 и 0,4 %, уран – $1,2 \cdot 10^{-4}$ и $0,5 \cdot 10^{-4}$ %, торий – $8 \cdot 10^{-4}$ %. В контурах ПГУ и его непосредственной близости отмечены ареалы и рудопроявления сульфидных руд с содержанием никеля от 0,1–0,7 до 1 и более процентов. По размерам это наиболее крупный участок – $1,7 \times 4,9$ км. Потенциальный рудный объект падает в южном направлении под крутым углом.

ПГУ-1 № 2 обособлен в центре площади в пределах РКК второго типа. Соответственно, его характеристика несколько отличается от вышеприведенных: амплитуда аномалий магнитного поля составляет 400 нТл, электросопротивление снижено до 300 Ом·м и с глубиной не изменяется, проводимость в

интервале глубин 50–200 м составляет 0,1–0,15 См, максимумы и минимумы ЕРЭ сближены при соответствующих концентрациях у калия – 2 и 0,4 %, у урана – $1,7 \cdot 10^{-4}$ и $0,67 \cdot 10^{-4}$ %, тория – $11,57 \cdot 10^{-4}$ и $3,27 \cdot 10^{-4}$ %. Параметры участка составляют $0,8 \times 3,3$ км. Падение рудного объекта – от крутого в южном направлении до вертикального.

ПГУ-1 № 3 сочленяется с вышеприведенным участком с востока. По физико-геохимическим показателям он практически идентичен участку № 2 при более высоких амплитудах магнитных максимумов (750 нТл) и минимумов проводимости (0,2–0,22 См). В контуре ПГУ закартирован ареал сульфидных руд с содержанием никеля 0,1–0,7 %. Размеры участка



№ 3 равны 1,4×7,8 км. Падение рудных объектов близко к вертикальному.

ПГУ-1 № 4 выделен южнее ПГУ-1 № 1 и расположен в пределах развития кор выветривания по сульфидному субстрату. На это указывает следующее: реликты магнитных объектов – ограниченных размеров и амплитуды аномалий – 230 нТл, низкие электросопротивления, еще более уменьшающиеся с глубиной (от 400 Ом·м на 50 м до 300 Ом·м на 200 м), проводимость составляет 0,15 См, мозаично расположенные «разнознаковые» ореолы радиоактивной триады (калий – 1 и 0,3 %, уран – $1 \cdot 10^{-4}$ и $0,37 \cdot 10^{-4}$ %, торий – $5,77 \cdot 10^{-4}$ и $0,67 \cdot 10^{-4}$ %). Размеры участка составляют 0,95×3,7 км. Падение рудной зоны, судя по геометрии реликтов пирротиновых тел, близко к вертикальному.

По результатам 3D-моделирования геоэлектрической среды, выполненного в

пределах ПГУ № 1, выделены высокопроводящие геоэлектрические неоднородности, соответствующие сульфидному медно-никелевому оруденению (см. рис. 5). Это обеспечивает корректность рекомендаций местоположения, а также параметров бурения поисковых скважин. Очевидно, что высокая степень детализации рудных объектов позволяет либо резко сократить объемы проверочных наземных исследований, либо вообще обойтись без подобных экономически затратных работ.

Заключение

Таким образом, рассмотренный комплекс аэрогеофизических работ представляется оптимальным при поисках и оценке объектов медно-никелевого оруденения в различных геологических обстановках и рекомендуется при решении аналогичных задач в сходных геолого-геофизических условиях.

Библиографический список

1. Тригубович Г.М., Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Чернышев А.В., Персова М.Г. Трехмерная электроразведка МПП: теория и практика // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения: сб. тр. конф. «Актуальные проблемы геологической отрасли АК "АЛРОСА" и научно-методическое обеспечение их решений» (г. Мирный, 31 марта – 4 апреля 2003 г.). Мирный, 2003. С. 301–311.

2. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск: Наука, 2009. 217 с.

3. Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M. Transients Geo-Electromagnetics. Munich: Ludwig-Maximilian-University of Munich, Vela Verlag, 2010. 304 p.

4. Бродовой В.В., Борцов В.Д., Подгорная Л.Е. [и др.]. Геофизические методы разведки рудных месторождений. М.: Недра, 1990. 295 с.

5. Андреев В.Е., Бобачев А.А., Варенцов Ив.М., Верещагина М.П., Куликов В.А., Яковлев А.Г. [и др.]. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на

объектах ГМК «Норильский Никель» // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С. 71–79.

6. Куликов В.А., Варенцов И.М., Стерлигова И.Д., Соловьева А.В. Оценка удельного электрического сопротивления богатых медно-никелевых руд Норильского региона // Геофизика. 2014. № 6. С. 25–29.

7. Мельников А.В., Степанов В.А., Гвоздев В.И. Рудопроявление Стрелка – представитель медно-никелевого и благороднометалльного оруденения в роговообманковых базитах (Верхнее Приамурье) // Вестник Амурского государственного университета. 2007. № 37. С. 111–116.

8. Шека С.А. Петрология и рудоносность никеленосных дунито-троктолитовых интрузий Станового хребта. М.: Недра, 1969. 136 с.

9. Магматические горные породы: монография / ред. О.А. Богатиков. Т. 5. Ультраосновные породы. М.: Наука, 1988. 508 с.

10. Степанов В.А. Медно-никелевые месторождения востока Евразии (литературный обзор современных представлений) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 139–148.

References

1. Trigubovich GM, Soloveichik YuG, Royak ME, Chernyshev AV, Persova MG. 3-D

Transient electrical survey: theory and practice. In: *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy*



aktsionernoi kompanii "ALROSA": sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya: sbornik trudov konferentsii "Aktual'nye problemy geologicheskoi otrasli Ak "Alrosa" i nauchno-metodicheskoe obespechenie ikh reshenii" = Geological aspects of the Alrosa JSC's mineral resources base: state-of-the-art, prospects, and solutions: Conf. collected papers "Present issues in the geological industry of JSC Alrosa, and R&D support", 31 March – 4 April 2003, Mirny. Mirny; 2003. p.301–311. (In Russ.)

2. Trigubovich GM, Persova MG, Soloveichik YuG. 3-D TEM sounding. Novosibirsk: Nauka; 2009. 217 p. (In Russ.)

3. Kamenetsky FM, Stettler EH, Trigubovich GM. Transients Geo-Electromagnetics. Munich: Ludwig-Maximilian-University of Munich, Vela Verlag; 2010. 304 p.

4. Brodovoi VV, Bortsov VD, Podgornaya LE, et al. Geophysical methods in ore deposit survey. Moscow: Nedra; 1990. 295 p. (In Russ.)

5. Andreev VE, Bobachev AA, Varentsov IvM., Vereshchagina MP., Kulikov VA, Yakovlev AG, et al. Integration of geophysical methods in prospecting for copper-nickel ores at Noril'skiy Nikel GMK (ore mining and smelting enterprise). Prospect

and Protection of Mineral Resources. 2006;8:71–79. (In Russ.)

6. Kulikov VA, Varentsov IM, Sterligova ID, Solov'eva AV. Evaluation of the electrical resistivity of rich copper-nickel ores of the Noril'sk region. Russian Geophysics. 2014;6:25–29. (In Russ.)

7. Mel'nikov AV, Stepanov VA, Gvozdev VI. Strelka ore occurrence as a representative of copper-nickel and precious metal mineralization in corniferous basic rocks (Verkhneye Priamurye). Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta = Amursk State University Bulletin. 2007;37:111–116. (In Russ.)

8. Sheka SA. Petrology and ore-bearing capacity of the nickel-bearing dunite-troktolite intrusions of the Stanovoy Ridge. Moscow: Nedra; 1969. 136 p. (In Russ.)

9. Bogatkov OA. Magmatic rocks. Vol. 5. Ultra-basic rocks. Moscow: Nauka; 1988. 508 p. (In Russ.)

10. Stepanov VA. Copper-nickel deposits of the east of Eurasia. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences. 2009;1(13):139–148. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Пустозеров М.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

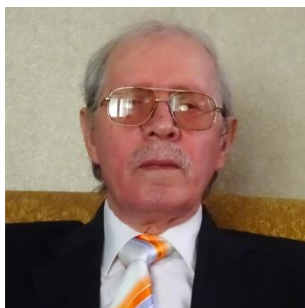
Maksim G. Pustozarov is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Сведения об авторе / Information about the author



Пустозеров Максим Григорьевич,

главный геофизик,

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка»,

630007, г. Новосибирск, Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, Россия,

✉ e-mail: mpustozarov@yandex.ru

Maksim G. Pustozarov,

Chief Geophysicist,

CJSC "Aerogeophysical survey",

4/1207, Oktyabrskaya magistral', Novosibirsk, 630007, Russia,

✉ e-mail: mpustozarov@yandex.ru