

Геомагнитная модель рудных тел серебро-полиметаллических месторождений Верхоянья на примере месторождения Ночное

Доровской А.П., Романов А.А., Сыропятов А.А., Ильин В.В.

ООО «ГК Сырьевые Активы», Санкт-Петербург, adorovskoy@rjcgroup.ru

Аннотация. Серебро-полиметаллические объекты Верхоянья мало изучены крупномасштабными поисковыми геофизическими методами. Как правило, на месторождениях и рудопрооявлениях серебра Якутии аномальное магнитное поле малоамплитудное и магматические образования отсутствуют. Эти обстоятельства не позволяли подобрать оптимальный набор геофизических поисковых методов. Настоящая работа посвящена применению магниторазведки при поисках серебро-полиметаллических месторождений на примере рудопрооявления Ночного (Аллара-Сахский рудный узел). На рудопрооявлении Ночном по эталонному буровому профилю проведено 2D-моделирование, которое продемонстрировало, что рудовмещающие структуры в магнитном поле отображаются как высокоградиентные локальные слабоамплитудные положительные аномалии до 5–6 нТл. Положительный характер аномалий обусловлен сидеритом. В статье предложена методика полевой съемки и обработки данных, которая позволяет выделить потенциально рудовмещающие структуры.

Ключевые слова: магниторазведка, геомагнитная модель, геофизические методы, серебро-полиметаллические месторождения.

Geomagnetic model of ore bodies of silver-polymetallic deposits of Verkhoyansk on the example of the Nochnoy deposit

Dorovskoy A.P., Romanov A.A., Syropyatov A.A., Ilyin V.V.

GK Assets, LLC. Saint-Petersburg, adorovskoy@rjcgroup.ru

Abstract. Silver-polymetallic deposits in the Verkhoyansk region have been poorly studied using large-scale geophysical exploration methods. Typically, silver deposits in Yakutia exhibit low-amplitude anomalous magnetic fields and lack magmatic formations, which has hindered the selection of an optimal set of geophysical exploration methods. This study focuses on the use of magnetometry to search for silver-polymetallic deposits, with the Nochnoy deposit (Allara-Sakh ore cluster) serving as an example. 2D modeling was conducted along a reference borehole profile, revealing that ore-bearing structures are reflected in the magnetic field as high-gradient, local, low-amplitude positive anomalies up to 5–6 nT. The positive nature of the anomalies is due to the presence of siderite. This article proposes a methodology for conducting field surveys and processing data that can aid in identifying potential ore-bearing structures.

Key words: magnetic survey, geomagnetic model, geophysical methods, silver-polymetallic deposits.

Введение

Одной из особенностей серебро-полиметаллических объектов Верхоянья является то, что они мало изучены крупномасштабными поисковыми геофизическими методами. Имеются лишь фрагментарные данные по применению классических методов. При этом наши предшественники неоднократно отмечали, что магниторазведочные методы неэффективны для поиска рудных зон (Федянин, 2005; Поркунова, 2015; Роев, 2019), что объясняется малой амплитудой аномального магнитного поля в ± 10 –20 нТл, амагматичностью участков работ, малым или вовсе отсутствующим содержанием ферромагнитных минералов в рудоносных структурах.

Мы провели комплекс методических работ, направленных на выбор оптимального набора геофизических методов для поиска серебро-полиметаллических жил и рудоносных структур. Комплекс включал в себя магниторазведку, гамма-спектрометрию, электроразведку методами СГ-ВП и электротомографии. Настоящая работа посвящена применимости магниторазведки для изучения серебро-полиметаллических рудопрооявлений и месторождений Верхоянья.

Рудопрооявление Ночное расположено в Томпонском районе Республики Саха (Якутия) на территории листа Q-53-XXXV (рис. 1) в пределах Аллара-Сахского рудного узла.

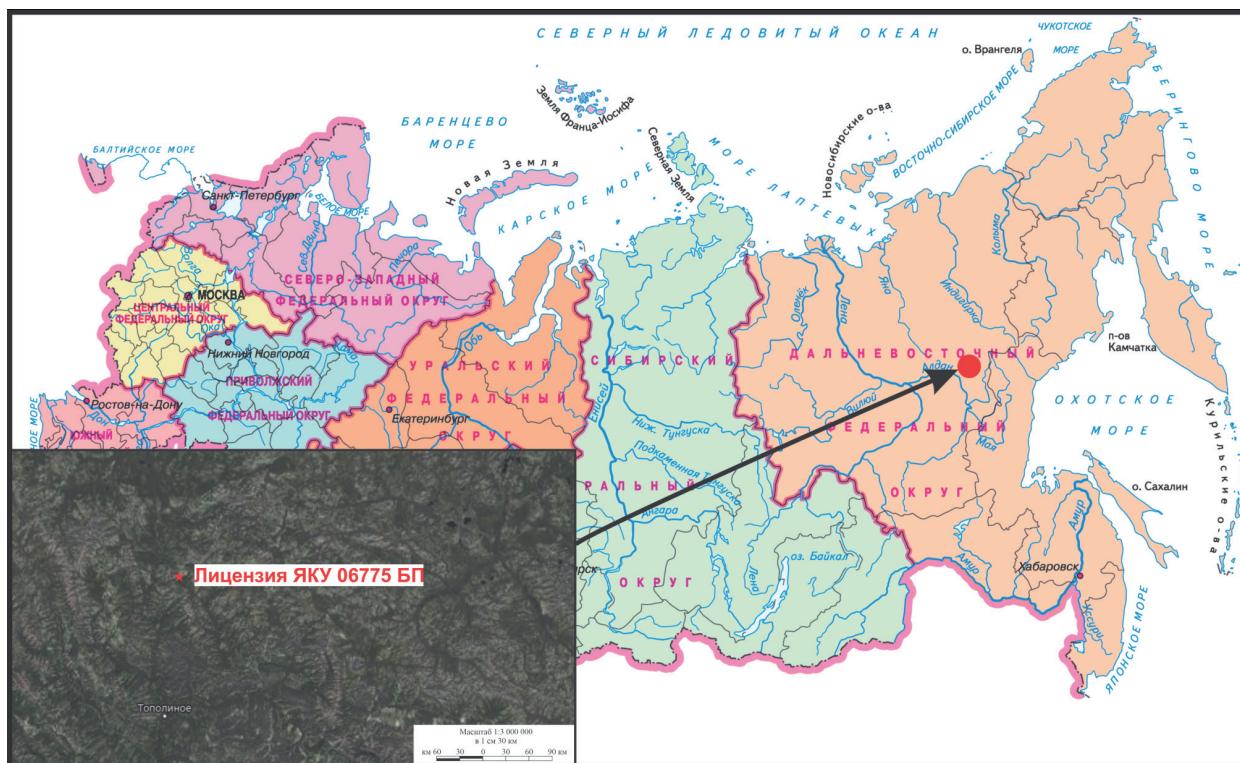


Рис. 1. Схема местоположения рудопроявления Ночное.

Fig. 1. Location of the Nochnoy deposit.

Вмещающие породы представлены верхнепермскими песчаниками, алевролитами, алевропесчаниками Верхоянского терригенного комплекса. В пределах рудопроявления, как и всего Аллара-Сахского рудного узла, магматические образования не обнаружены (рис. 2).

Рудовмещающие структуры представляют собой зоны дробления взбросо-сдвиговой кинематики с кварц-карбонатным прожилкованием. Осевые части структур представлены брекчией и катаклазитами. Основные жильные минералы: кварц, сидерит, доломит и анкерит. Основные рудные минералы: самородное серебро, галенит, аргентотетраэдрит, пираргирит. Зона окисления или линейные коры выветривания отсутствуют, из вторичных минералов отмечается только гетит, развивающийся по сидериту и анкериту. Сидерит и анкерит частично замещены гематитом на завершающих этапах гидротермально-метасоматической деятельности. В пределах рудовмещающих структур участки с промышленно значимым серебряным оруденением локализуются в виде линз, гнезд и жил протяженностью до 100–150 м по простиранию и падению, мощностью в первые метры.

Ферромагнитные минералы, играющие основную роль в формировании положительных аномалий над рудной структурой, представлены сидеритом, гетитом, в меньшей степени – магнетитом и гематитом. Последние, вероятно, содержатся в количестве, меньше определяемого методом валового рентгено-фазового анализа (табл. 1).

Во вмещающих породах достаточно широко развит гетит. При этом его магнитная восприимчивость составляет 2.5×10^{-4} ед. СИ, что на порядок ниже каппы у сидерита – $(2.5 - 7.5) \times 10^{-3}$ ед. СИ (Петрофизика..., 1992). Эта разница отчасти нивелирует повсеместную распространенность гетита.

Крупномасштабная магнитная съемка выполнялась для решения поисковых и структурно-картировочных задач, уточнения границ потенциально рудоносных зон и особенностей их внутреннего строения.

Петрофизические исследования проводились с целью создания геомагнитной модели путем итеративного процесса, включающего в себя решение прямой и обратной задач с внесением уточняющих параметров в ручном и полу-автоматическом режиме на каждой итерации. Геомагнитная модель призвана улучшить качество интерпретации полевых данных площадной магнитометрии пу-

тем наглядного отображения и сопоставления искоемых объектов в рассчитанном и наблюдаемом полях, а именно: определить тип аномалий, представляющих поисковый интерес, подобрать подходящие трансформанты и фильтры для их контрастного отображения.

Таблица 1. Результаты валового рентгено-фазового анализа образцов рудовмещающей структуры участка Ночной

Table 1. Results of X-ray diffraction analyses of the ore-bearing structure of the Nochnoy deposit

Результаты валового рентгено-фазового анализа, %			
Название	Min	Max	Ср. знач
Кварц	36.8	50.3	43.9
Альбит	11.1	21.7	14.7
Анортит	7.3	13.1	10.7
Мусковит	2.8	6.8	4
Гегит	2.1	2.7	2.4
Сидерит	15.7	23	19.8
Клинохлор	2.8	5.6	3.6
Галенит	0.5	1.4	0.9



Рис. 2. Схема геологического строения участка работ (Роев, 2019).

Fig 2. Geological map of the Nochnoy deposit.

Материалы и методы

При осуществлении петрофизических исследований используемая аппаратура представлена измерителем магнитной восприимчивости ПИМВ. Характеристики прибора и методики измерений, учета неровностей, перехода от значений кажущейся магнитной восприимчивости (χ') к истинной (χ) приведены в (Geodevice, 2020).

Магниторазведка выполнялась с использованием оверхаузеровских магнитометров MiniMag. Их технические характеристики приведены в (Geodevice, 2020). Полевые работы выполнены в соответствии с (Инструкция по магниторазведке..., 1981). Шаг съемки – 50×5 м, обусловлен мощностью и простиранием рудовмещающих структур.

Магниторазведка

Для повышения качества данных на каждом пикете выполнялось по 3 измерения, которые затем осреднялись. Это существенно повысило достоверность выделяемых малоамплитудных локальных аномалий. Помимо этого, в исходные данные вводились поправка за оператора, поправка за магистральные профили, медианная поправка. Применялись робастные методы обработки данных.

Объем контрольных измерений составил 5 %. Среднеквадратичная погрешность – ± 1.367 нТл, что соответствует требованиям высокоточной съемки.

С целью получения качественной интерполяции оценивалось соответствие данных нормальному закону распределения. Если распределение отличалось от такового, исходные материалы подвергались нормированию.

На основе нормированных данных рассчитывались grd-файлы. Построение выполнялось с помощью метода «кригинг» в программе Surfer. На рассчитанные grd-файлы накладывались низкочастотные фильтры (low-pass 1) с целью устранения артефактов гридирования и «ряби» на изолиниях.

В результате строились карты аномального магнитного поля, служащие основой для построения различных трансформант с помощью Oasis Montaj.

Каппаметрия

На рудопроявлении Ночное измерения магнитной восприимчивости проводились по керну (646 точек). Измерения по керну выполнялись через 30 см по вмещающим породам и через 10 см по рудовмещающим структурам (зоны дробления, трещиноватости, прожилкования). Средняя относительная погрешность измерений составила менее 5 % при объеме контрольных измерений в 5 %.

Полученные данные прошли стандартную статистическую обработку в MS Excel с построением гистограмм, на основании которых выделялись петротипы.

2D-моделирование осуществлялось в программном комплексе ZondGM2D.

За основу решения прямой задачи взяты геологические разрезы, построенные по результатам бурения и горных работ. Геомагнитная модель была построена по полигонам, границы которых соответствовали литологическим и тектоническим. Полигонам присваивались значения магнитной восприимчивости, полученные для выделенных на предыдущем этапе петротипов. Рассчитанное аномальное магнитное поле сопоставлялось с наблюдаемым. В качестве наблюдаемых использовались интерполированные значения, снятые с «грида» карты изолиний аномального магнитного поля после внесения всех поправок.

Затем следовала корректировка введенных геометрических параметров и магнитной восприимчивости в заданных пределах, реализуемая программным инструментом и вручную так, чтобы рассчитанное поле максимально совпадало с наблюдаемым. Исходя из неэквивалентности геологических и петрофизических границ, часть исходных полигонов была разбита на несколько отдельных.

В результате множества итераций получен петромагнитный разрез. Рассчитанное магнитное поле отличается от наблюдаемого на 2.8 % (коэффициент невязки).

Результаты и обсуждение

Результаты статистической обработки данных капаметрии представлены гистограммами. Из них следует, что рассматриваемая выборка стратифицируется на три петромагнитных типа (рис. 3–4, табл. 2):

- песчаники со средним значением $\chi \approx 0.07 \times 10^{-3}$ ед. СИ;
- алевропесчаники, среднее значение магнитной восприимчивости которых составляет 0.13×10^{-3} ед. СИ;
- алевролиты, варьирующиеся в широких пределах χ от 0.17 до 0.527×10^{-3} ед. СИ.

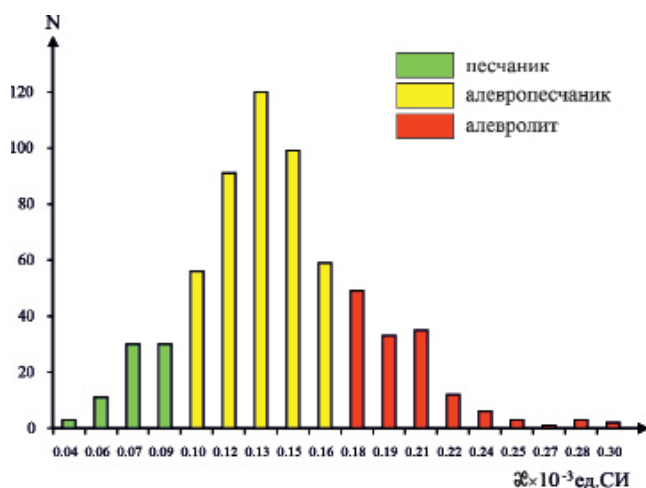


Рис. 3. Гистограмма распределения магнитной восприимчивости пород месторождений Ночное и Хачакчан.

Fig. 3. Histogram of the distribution of magnetic susceptibility of rocks from the Nochnoye and Khachakchan deposits.

Гистограмма распределения магнитной восприимчивости носит мономодальный характер, экстремум которого приходится на алевропесчаники (рис. 4, Б), наиболее широко развитые на исследуемой территории. Левая асимметрия свидетельствует о наличии в изучаемой коллекции второго петротипа, представленного песчаниками (рис. 4, А). Сильно выраженная правая асимметрия обусловлена алевролитами (рис. 4, В).

Изучение петромагнитных свойств пород позволило моделировать исследуемую среду с дальнейшим расчетом магнитного поля и сопоставлением его с наблюдаемым, что дало возможность уточнить распределение петромагнитных масс, определить форму аномалий в наблюдаемых полях над искомыми объектами и оценить корректность примененных трансформант и фильтров.

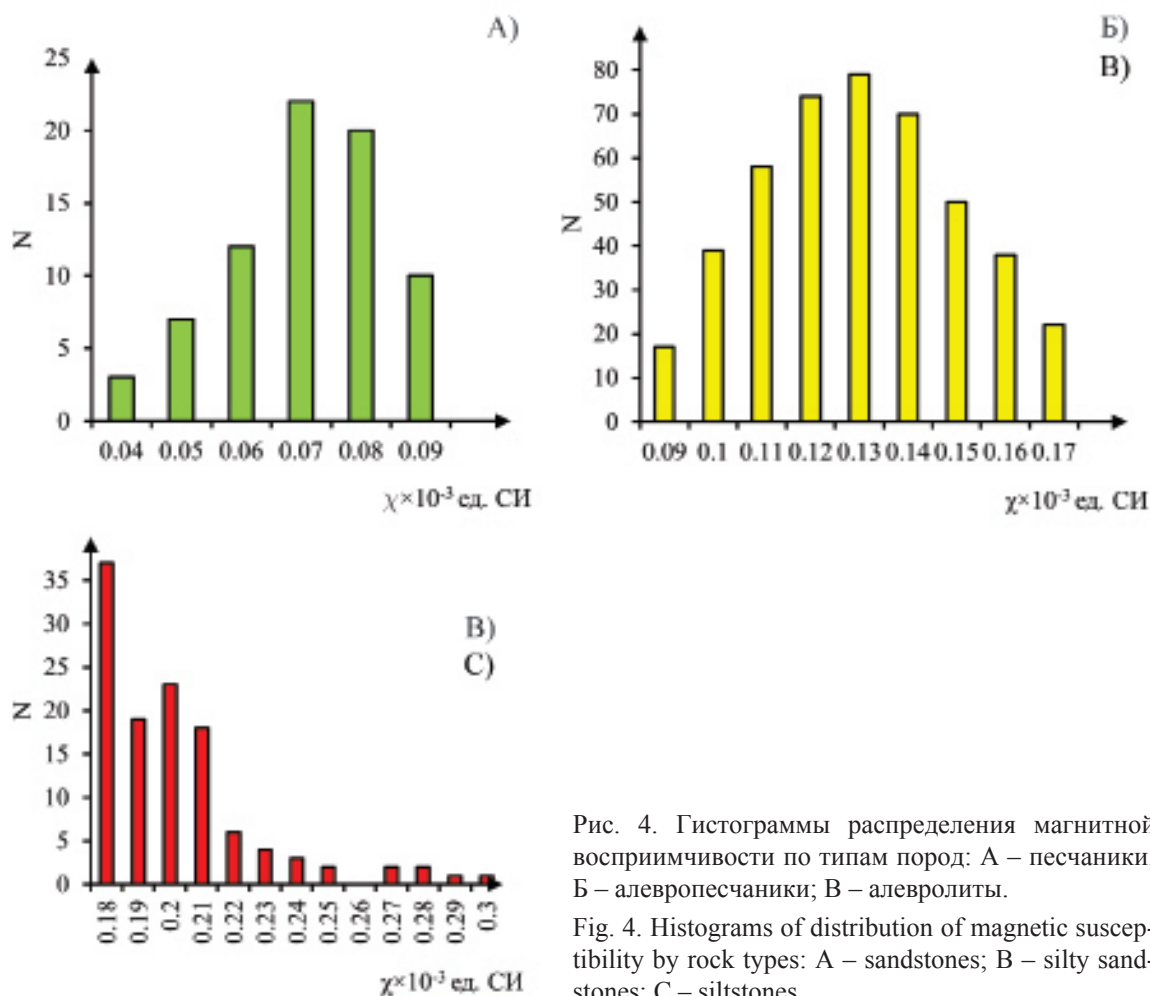


Рис. 4. Гистограммы распределения магнитной восприимчивости по типам пород: А – песчаники; Б – алевропесчаники; В – алевролиты.

Fig. 4. Histograms of distribution of magnetic susceptibility by rock types: А – sandstones; Б – silty sandstones; В – siltstones.

Таблица 2. Распределение магнитной восприимчивости по выделенным петротипам
Table 2. Distribution of magnetic susceptibility by identified petrotypes

Петротип	Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-3}$ ед. СИ	
	$\frac{\min}{\max}$	Ср. знач.
Песчаник	$\frac{0.037}{0.085}$	0.07
Алевропесчаник	$\frac{0.086}{0.169}$	0.13
Алевролит	$\frac{0.170}{0.527}$	0.20

Результат моделирования (геомагнитный разрез) и интерпретационный разрез представлены на рисунках 5–6. Полученная модель достаточно хорошо коррелирует с результатами петрофизических исследований: на разрезе четко выделяются пачки песчаников с пониженными значениями магнитной восприимчивости; толщи алевропесчаника с пластами алевролитов, отмечаемых отно-

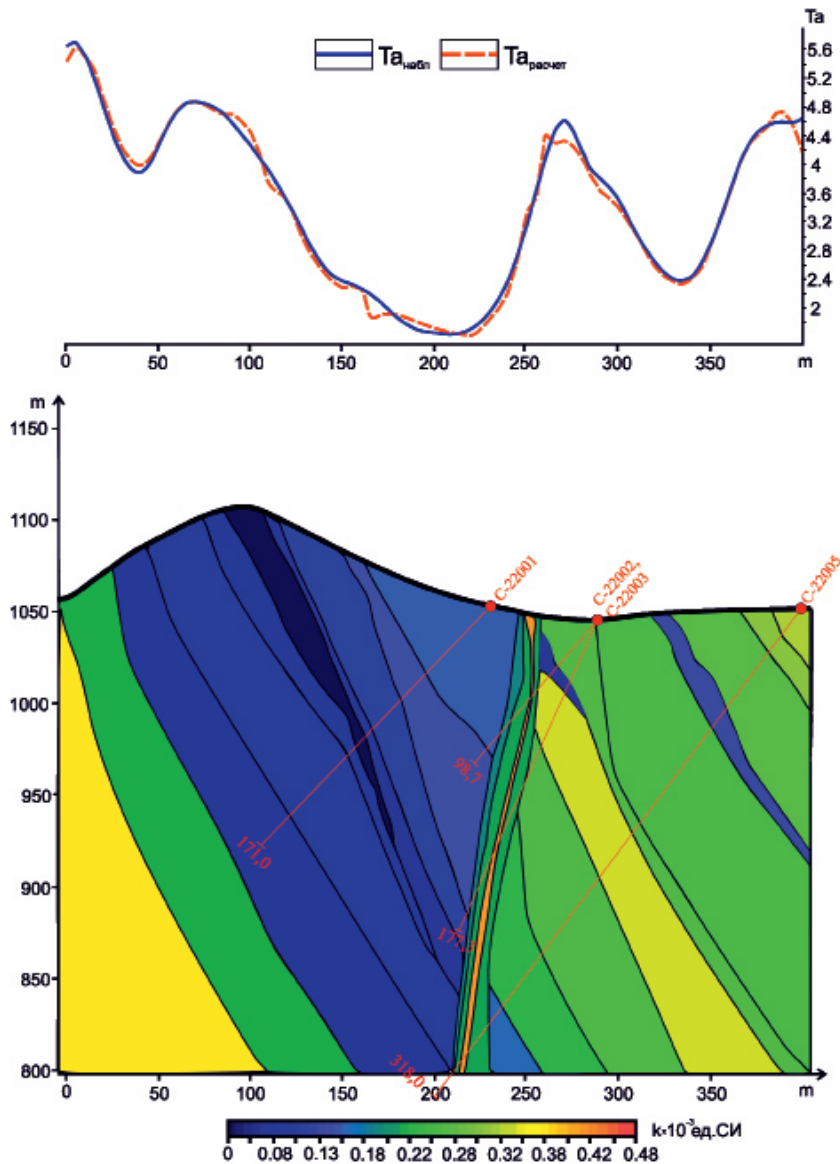


Рис. 5. Геомагнитный разрез по профилю бурения месторождения Ночное.
Fig. 5. Geomagnetic section along the drilling profile of the Nochnoy deposit.

сительно повышенными значениями магнитной восприимчивости. Рудная зона, выделяемая по результатам бурения, явно отображается наиболее высокими значениями χ для центральной части и повышенными значениями этого же параметра в окаймляющих частях. Как и ожидалось, рудовмещающая структура приурочена к высокоградиентной малоамплитудной локальной положительной аномалии. При этом наблюдается четкая дифференциация по магнитным свойствам частей одних и тех же пластов по обе стороны от рудной структуры. На данный момент мы рассматриваем две версии, объясняющие это:

1) Неравномерный характер распределения сидерита, за счет чего один и тот же пласт меняет свои свойства по падению.

2) Тектонически ослабленная зона (рудовмещающая структура) является взбросом. Таким образом, пласты приподнятого блока не являются продолжением пластов опущенного блока, а самостоятельными, более насыщенными предположительно гетитом, разностями алевролита.

На основе приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1) Рудовмещающие структуры представлены участками кварц-карбонатного прожилкования в пределах тектонически ослабленных зон дробления и трещиноватости, которые в магнитном поле отображаются как высокоградиентные локальные слабоамплитудные положительные аномалии до 5–6 нТл. Положительный характер аномалий обусловлен сидеритом.

2) Вмещающие породы представлены тремя петротипами: песчаниками с пониженной магнитной восприимчивостью, алевропесчаниками со средними для участка работ значениями χ , алевролитами с относительно высокой χ . Различие в магнитной восприимчивости, вероятно, обусловлено разным содержанием гетита и, в меньшей степени, неравномерным распределением сидерита, магнетита и гематита.

3) Производная 1-го порядка по локальной составляющей аномального магнитного поля в направлении, соответствующем ожидаемому простиранию искоемых объектов, эффективно картирует положение потенциально рудовмещающих структур

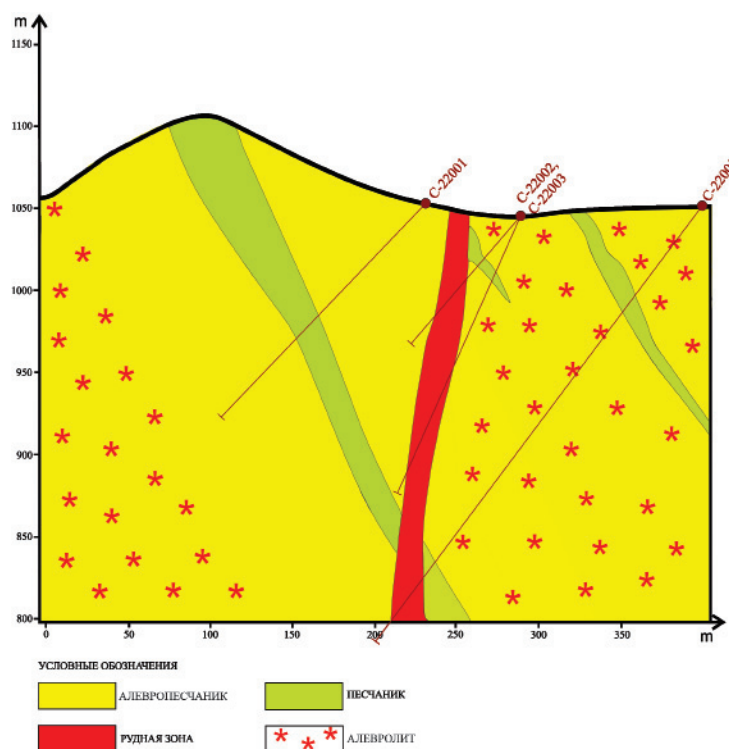


Рис. 6. Интерпретационный разрез по профилю бурения месторождения Ночное.

Fig. 6. The interpretation of geomagnetic section along the drilling profile of the Nochnoy deposit.

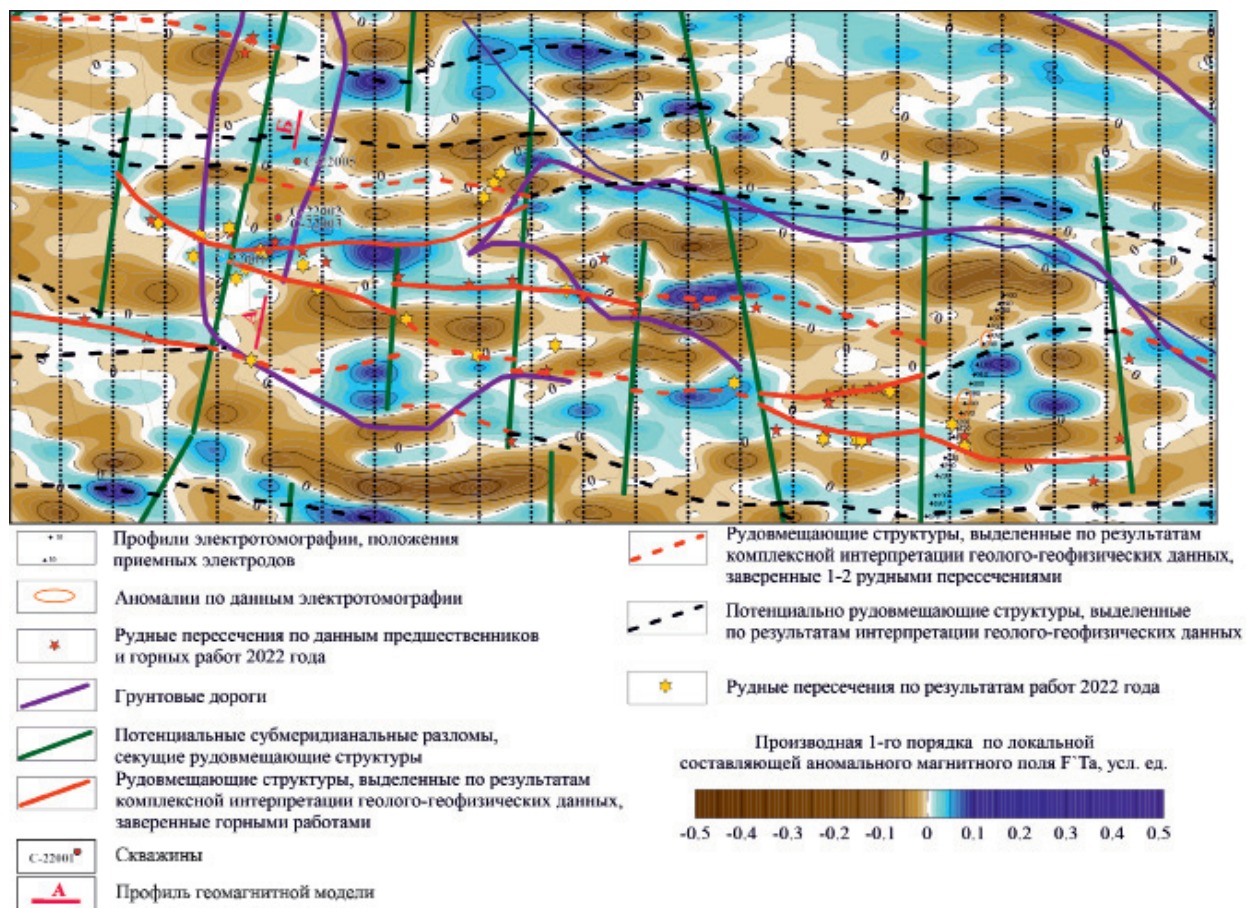


Рис. 7. Схема результатов комплексной интерпретации геолого-геофизических данных на уч. Ночной.

Fig. 7. Scheme of the results of the integrated interpretation of geological and geophysical data for the Nochnoy deposit.

Озвученные тезисы хорошо согласуются с априорной геологической информацией, а также нашли свое подтверждение в результатах горных работ. Схема комплексной интерпретации геолого-геофизических данных представлена на рисунке 7.

Заклучение

Проиллюстрирована эффективность крупномасштабных магниторазведочных работ при поисках серебро-полиметаллических жил на примере рудопроявления Ночное.

Для успешного выделения структур, перспективных для дальнейшего опoискования, в условиях малоамплитудных и слабоконтрастных полей следует акцентировать внимание на качестве полевых работ и первичных материалов: выполнять несколько измерений на одном пикете, проходить увязочные маршруты даже для малых площадей съемки, устанавливать малый шаг дискретизации для магнитовариационных станций, вводить поправки за различных операторов и оборудование и пр.

При обработке и интерпретации данных рекомендуется отдавать предпочтение трансформантам и фильтрам, которые подчеркивают малоамплитудные локальные аномалии или высокоградиентные зоны, сохраняя при этом знак аномалии – tilt-трансформанта, вертикальная производная, горизонтальная производная в направлении, соответствующем предполагаемому простиранию пород (не полный горизонтальный градиент).

Дальнейшая разбровка структур, выделенных методами магниторазведки, может быть проведена другими геофизическими и геохимическими методами, а также прямыми геологическими наблюдениями.

Литература

1. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка) // М-во геологии СССР. Л.: Недра, 1981. 263 с.
2. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. П 29. Горные породы и полезные ископаемые/ под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391 с.: ил.
3. Поркунова А.Л. и др. Поисковые работы на серебро в пределах северного фланга Нижнеимнеканского рудного узла (Республика Саха (Якутия)). Якутск. ГУГПП РС (Я) «Якутскгеология», 2015.
4. Роев Н.А. и др. Поисковые работы на серебро в пределах Аллара-Сахского рудного узла (Республика Саха (Якутия)). М.: АО «Росгео», 2019.
5. Руководство по эксплуатации. Измеритель магнитной восприимчивости ПИМВ. Geodevice, 2020. 23 с.
6. Руководство по эксплуатации. Пешеходный оверхаузеровский магнитометр MiniMag. Geodevice. 60 с.
7. Федянин А.Н. и др. Прогностно-поисковые работы в Западном Верхоянье с целью создания новой сереборудной провинции. Батагай. УГГП РС (Я) «Янггеология», 2005.