

Опыт использования микромагнитной съемки для картирования Южносопчинского платиноносного интрузива, Мончегорский рудный район

Н. Ю. Грошев*, А. М. Сущенко, А. Б. Раевский, А. Н. Иванов, А. В. Чернявский

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: n.groshev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-4387>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 26.12.2024;

получена после доработки 17.02.2025;

принята к публикации 18.02.2025

Ключевые слова:

микромагнитная съемка, элементы платиновой группы, расслоенные интрузии, Мончегорский комплекс, Кольский регион

Норит-пироксенитовая зона, содержащая оруденение элементов платиновой группы (ЭПГ), располагается в основании Южносопчинского интрузива, входящего в состав Мончегорского расслоенного комплекса. Сложное геологическое строение норит-пироксенитовой зоны, залегающей наклонно под углами от 20° до 80°, определяется частым чередованием пироксенитов и такситовых габброидов мафитового состава. Первая группа пород этой зоны, представленная пироксенитами с прослоями перидотитов, сформировалась, как предполагается, раньше, чем породы второй группы, включающей рудоносные такситовые мафиты, распространенные по всей зоне в виде линзообразных жильных тел. Впервые примененная в Кольском регионе микромагнитная съемка является эффективным инструментом для изучения таких сложных объектов. В статье представлены результаты съемки двух детальных участков, расположенных в пределах рудопроявления ЭПГ Арваренч и изученных в 2011 и 2024 гг. по сетям 5×1 м и 4×1 м соответственно. Анализ, проведенный на основе сопоставления потерь информации при использовании сетей с меньшей детальностью, показывает, что потери в случае разрежения сети являются существенными и эффективность магнитной съемки для картирования значительно снижается. Результаты петрофизических измерений и микромагнитной съемки в совокупности дают основание для следующих предположений относительно магнитного поля над норит-пироксенитовой зоной: 1) высокоамплитудные положительные аномалии связаны с перидотитами; 2) оруденелые такситовые мафиты, которые содержат значительную долю магнетита наряду с вкрапленными сульфидами, выделяются аномалиями средней амплитуды; 3) нижний контакт интрузива с менее магнитными архейскими гнейсами фиксируется в магнитном поле отрицательной аномалией изогнутой формы; 4) тектонические зоны, состоящие, вероятно, из повторно намагниченных пород, отмечаются линейными отрицательными аномалиями. Утверждается, что микромагнитная съемка в сочетании с детальной магнитометрией может использоваться для геологического картирования расслоенных интрузивов и поисков ЭПГ оруденения.

Для цитирования

Грошев Н. Ю. и др. Опыт использования микромагнитной съемки для картирования Южносопчинского платиноносного интрузива, Мончегорский рудный район. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 1. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-5-18>.

Micromagnetic survey experience in the mapping of the South Sopcha platinum-bearing intrusion, Monchegorsk ore district

Nikolay Yu. Groshev*, Artyom M. Sushchenko, Alexey B. Raevsky, Anton N. Ivanov, Alexey V. Chernyavsky

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk Region, Russia;
e-mail: n.groshev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-4387>

Article info

Received 26.12.2024;

received in revised form 17.02.2025;

accepted 18.02.2025

Key words:

micromagnetic survey, platinum group elements, layered intrusions, Monchegorsk complex, Kola Region

Abstract

The norite-pyroxenite zone hosting platinum group element (PGE) mineralization is located at the base of the South Sopcha intrusion being a part of the Monchegorsk layered complex. The complex geological structure of the norite-pyroxenite zone, dipping at angles from 20° to 80°, is defined by frequent alternation of pyroxenites and taxitic gabbroids of mafic composition. There is an assumption that the first group of rocks of this zone, represented by pyroxenites with peridotites interlayers, was formed before the rocks of the second group, including mineralized taxitic mafic gabbroids distributed throughout the whole zone in the form of lenticular vein-like bodies. Micromagnetic survey used for the first time in the Kola Region is an effective tool for studying objects with such complex structures. The results of the micromagnetic survey at two detailed sites located within the Arvarench PGE occurrence, surveyed in 2011 and 2024 using 5×1 m and 4×1 m grids, respectively, are presented in our paper. The analysis based on a comparison of the loss of information when using less detailed grids shows that the loss in the case of grid discharge is significant and the effectiveness of the magnetic survey for mapping is greatly reduced. The results of petrophysical measurements and micromagnetic survey together lead to the following assumptions about the magnetic field over the norite-pyroxenite zone: 1) high-amplitude positive anomalies are associated with peridotites; 2) mineralized taxitic mafics containing a high proportion of magnetite along with disseminated sulfides are characterized by medium-amplitude anomalies; 3) the lower contact of the intrusion with less magnetic Archean gneisses is fixed in the magnetic field by a negative curve-shaped anomaly; 4) tectonic zones probably consisting of remagnetized rocks are marked by linear negative anomalies. It is argued that micromagnetic survey in combination with detailed magnetometry can be used for geological mapping of layered intrusions and prospecting for PGE mineralization.

For citation

Groshev, N. Yu. et al. 2025. Micromagnetic survey experience in the mapping of the South Sopcha platinum-bearing intrusion, Monchegorsk ore district. *Vestnik of MSTU*, 28(1), pp. 5–18. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-5-18>.

Введение

Мончегорский рудный район хорошо известен тем, что в нем на относительно небольшой площади содержатся практически все типы руд, характерные для мафит-ультрамафитовых расслоенных массивов (Козлов, 1973; *Расслоенные ...*, 2004). Отмечаются не только вкрапленные и массивные сульфидные руды (Козлов, 1973), но и стратиформные хромититы (Chashchin et al., 1999; Smolkin et al., 2023) и магнетиты (Грошев и др., 2018), напрямую связанные с расслоенными массивами палеопротерозойского возраста. Сульфидное оруденение Мончегорского района представлено двумя типами (Чащин и др., 2014): медно-никелевым и платинометальным. Платинометальное оруденение, изучением которого в Кольском регионе в последние годы занимаются десятки исследователей (Балабонин и др., 2000; Гроховская и др., 2003; *Расслоенные ...*, 2004; Субботин и др., 2012; Шарков и др., 2014; Нерадовский и др., 2017; Pripachkin et al., 2016; Subbotin et al., 2019; Vymazalová et al., 2020; Grokhovskaya et al., 2021; Чащин и др., 2022), разделяется на рифовое и контактное (Karykowski et al., 2018a,b). Если рифовый тип оруденения характеризуется относительно простым строением, образуя маломощные и протяженные пластовые тела (Нерадовский и др., 2002; Гребнев и др., 2014), то контактное платинометальное оруденение является по своей структуре более сложным и зачастую представляет собой проблему для геологического картирования (Грошев, 2010; Мирошникова и др., 2019). Располагаясь нередко внутри мощных магматических брекчий (Groshev et al., 2019) и габбро-пегматитовых "линейных штокверков" (Рыбникова и др., 2024 и ссылки там), рудные тела контактного типа, определяемые только опробованием, выделяются, в первую очередь, на геологических разрезах по данным бурения. Существуют примеры, когда месторождение детально изучено и опробовано, но не имеет геологической карты в классическом понимании (месторождение Федорова Тундра). Таким образом, чтобы понять геологию рудоносной зоны, которая, как правило, перекрыта моренной, необходим большой объем горных работ для вскрытия коренных выходов и геологического картирования. Однако если магнитные свойства пород такой рудоносной зоны различны, детальные магнитометрические исследования являются многообещающей альтернативой.

Норит-пироксенитовая зона Южносопчинского интрузива в Мончегорском районе (рис. 1) может рассматриваться как рудоносный "линейный штокверк" (Рыбникова и др., 2024). В пределах этой зоны выявлено два платинометальных рудных объекта: месторождение элементов платиновой группы (ЭПГ) Южная Сопча и проявление (ЭПГ) Арваренч. Пластовые и линзовидные рудные тела (или рудные жилы "штокверка") мощностью от одного метра представлены мафитовыми породами такситового сложения и габбро-пегматитами, содержащими сульфиды и магнетит (Pripachkin et al., 2016). Эти жилы пересекают пироксениты, среди которых встречаются прослои перидотитов мощностью до 20–30 м. Среднемасштабная магнитная съемка поисковой стадии, выполненная под руководством В. С. Войтеховича (2002 г.), выявляет высокодифференцированное поле над норит-пироксенитовой зоной. Рудные жилы не выявляются в магнитном поле при использованном масштабе съемки ввиду их небольшой мощности, в отличие от перидотитов, создающих высокоамплитудные аномалии.

Укрупнение масштаба магнитометрических исследований имеет большое значение при расшифровке сложных геологических структур, как показывают результаты пионерских детальных работ в районе хребта Серповидный в центре Кольского полуострова (Raevsky et al., 2019; Mudruk et al., 2022). Более того, пример рифа ФТ-2 на г. Федорова Тундра указывает на возможность применения детальных магнитометрических работ при поисках платинометального оруденения (Groshev et al., 2019; Грошев и др., 2011). Первый опыт детальной магнитной съемки Южносопчинского массива получен авторами в 2011 г. Относительно крупный участок размером 250×400 м, расположенный в юго-восточной части рудопроявления Арваренч и покрывающий нижний контакт и главные зоны стратиграфии интрузива, был изучен по сети 25×5 м в результате двух экскурсионных выездов. Фрагмент рудоносной норит-пироксенитовой зоны размером 50×50 м, расположенный внутри этого участка, был также изучен в условиях микромагнитной съемки (сеть 5×1 м). Увеличение детальности позволило получить над норит-пироксенитовой зоной новые линейные положительные аномалии средней амплитуды, которые можно интерпретировать как рудные жилы или их скопления. Продолжая начатый эксперимент с целью визуализации рудного штокверка, в 2024 г. мы целенаправленно изучили фрагмент этой зоны на северо-западе рудопроявления Арваренч в пределах периметра 100×160 м по сети 4×1 м. Этот участок является опорным для нашего эксперимента, поскольку мощность рудоносной зоны здесь больше, чем на первом участке, и три отдельных рудных тела выходят под моренные отложения, судя по геологической карте В. Н. Иванченко (2009).

В статье представлены полученные к настоящему времени результаты экспериментов по микромагнитной съемке Южносопчинского интрузива и рассматриваются некоторые аспекты применения этого метода для геологического картирования.

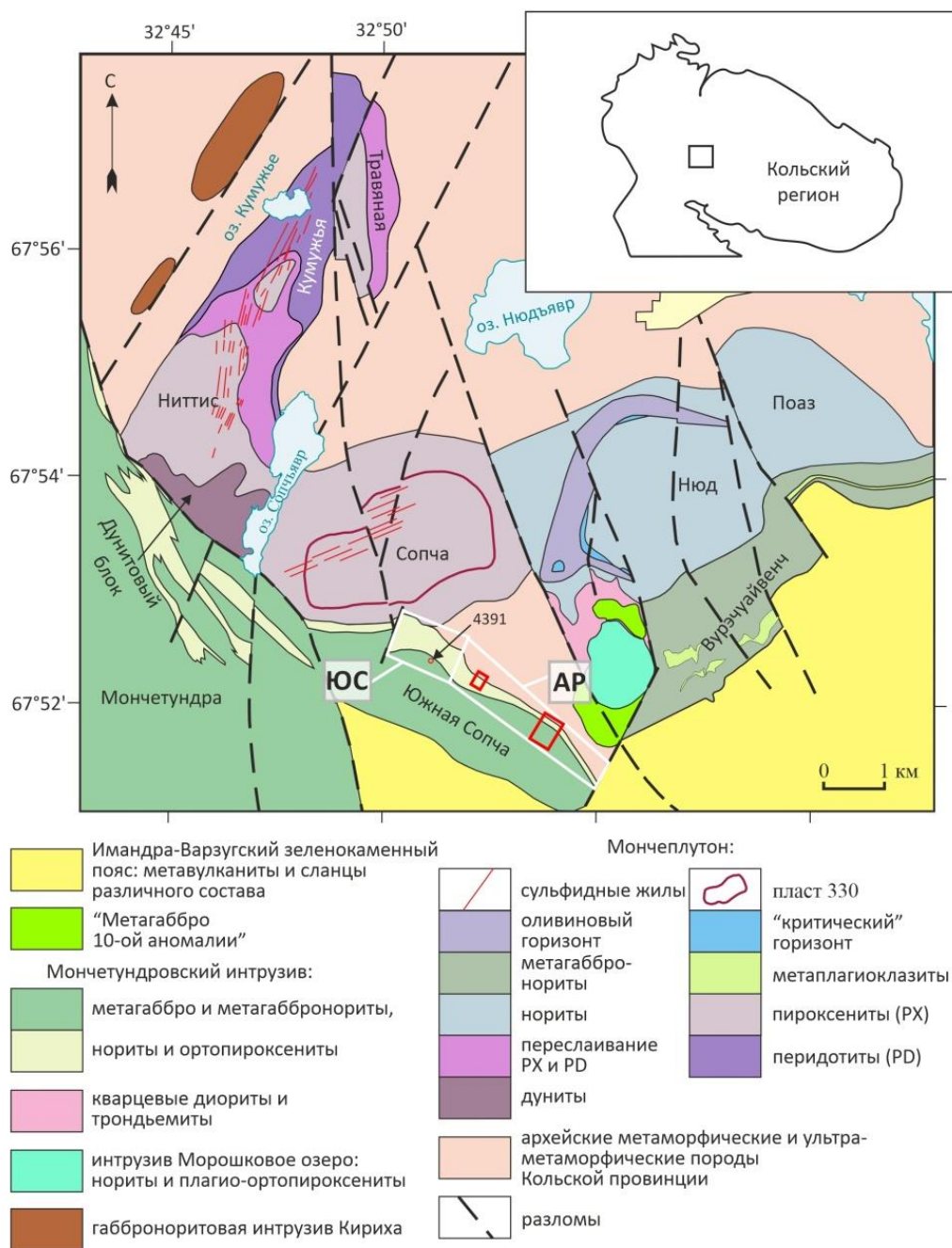


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Мончегорского рудного района. С изменениями по (Чащин и др., 2022). Белые контуры обозначают платинометалльные рудные объекты Южносопчинского интрузива: месторождение Южная Сопча (ЮС) и проявление Арваренч (АР). Красные прямоугольники показывают юго-восточный (ЮВ) и северо-западный (СЗ) участки микромагнитной съемки. Координаты восточных углов участков: 67° 51' 51.3875" N, 32° 53' 53.2632" E – ЮВ участок; 67° 52' 19.9479" N, 32° 52' 06.9401" E – СЗ участок

Fig. 1. Schematic geological map of the Monchegorsk ore district. Modified after (Chashchin et al., 2022).

White contours indicate targets of PGE mineralization within the South Sopcha intrusion: South Sopcha deposit (ЮС) and Arvarench (АР) occurrence; red rectangles show south-east (SE) and north-west (NW) areas of micromagnetic survey. Coordinates of the eastern corners of the areas: 67° 51' 51.3875" N, 32° 53' 53.2632" E, SE area; 67° 52' 19.9479" N, 32° 52' 06.9401" E, NW area

Геологическая обстановка

Южносопчинский массив является юго-восточным фрагментом Мончетундровского интрузива (Чащин и др., 2014), представляющего собой преимущественно габброидную часть Мончегорского палеопротерозойского расслоенного комплекса, который включает также мафит-ультрамафитовые породы Мончеплутона (Шарков

и др., 2014). Во внутреннем строении Южносопчинского массива выделяются две зоны (снизу вверх): норит-пироксенитовая и габбровая (рис. 1). Поисковые работы на платинометалльное оруденение проводились в пределах нижней зоны массива В. С. Войтеховичем (2002 г.) в конце девяностых и В. Н. Иванченко (2009 г.) в конце нулевых годов. В результате этих работ в северо-западной части массива было открыто месторождение Южная Сопча, а в юго-восточной – рудопроявление Арваренч (2009 г.).

Месторождение Южная Сопча (ЮС, рис. 1) имеет протяженность около 1 км и приурочено к норит-пироксенитовой зоне северо-западного простирания (312°). Эта зона представляет собой чередование такситовых меланократовых норитов, мезократовых норитов, габброноритов и других мафитовых пород с ортопироксенитами (Чащин и др., 2022). На геологических разрезах В. Н. Иванченко (2009), кроме ортопироксенитов, отмечаются отдельные прослои перидотитов и метаперидотитов размером до 30 м в поперечнике. Мощность зоны составляет 150–200 м, в ее пределах выделяется до 20 рудных тел линзовидной и пластообразной формы, представленных преимущественно такситовыми породами, включая габбро-пегматиты. Мощность рудных тел изменяется от 1 до 78 м, углы падения от 20° до 40° в ЮЗ румбах. Позицию минерализованных пород, как указано в (Рыбникова и др., 2024), можно охарактеризовать как "линейный штокверк", состоящий из серии субсогласных жил, секущих пироксениты и перидотиты, и обычно нейтрально представляемый в литературе как переслаивание (Чащин и др., 2014). Сульфидная минерализация в количестве 2–5 % представлена халькопиритом, пирротинном, борнитом и миллеритом. Минералы платиновых металлов в основном включают арсениды и теллуриды (Гроховская и др., 2012). Запасы платины и палладия составляют 15 и 49 т соответственно при суммарном содержании 1,42 г/т (Чащин и др., 2022).

Рудопроявление Арваренч (АР, рис. 1) протяженностью более 3 км является менее изученным продолжением месторождения Южная Сопча и располагается к юго-востоку от него по простиранию. Рудная зона проявления сложена теми же породами и также характеризуется сложным строением ввиду частого чередования рудных и безрудных участков, раздувов и пережимов рудных тел (Чащин и др., 2022). Углы падения пород достигают 80°, судя по относительно редким разрезам. Кроме этого, для рудопроявления Арваренч отмечается постепенное снижение мощности норит-пироксенитовой зоны в юго-восточном направлении до 40–50 м. Мощность рудных тел варьирует здесь от 6 до 40 м. Ресурсы платины и палладия составляют 33 и 116 т соответственно при суммарном содержании 1,52 г/т (Чащин и др., 2022).

Ширина рудоносной норит-пироксенитовой зоны на участке съемки, изученном в 2011 г. в юго-восточной части проявления Арваренч, составляет всего 70 м. В то же время ширина этой зоны на северо-западе рудопроявления в три раза больше, чем на юго-востоке (рис. 1). Поэтому для покрытия большей площади "линейного штокверка" мы изучили второй участок, расположенный на северо-западе, вблизи месторождения Южная Сопча.

Методика исследований

Отправной точкой нашего исследования являются материалы магнитной съемки Южносопчинского интрузива, выполненной по сети 100×10 м под руководством В. С. Войтеховича (2002 г.) в рамках поисковых работ на ЭПГ в Мончегорском районе. Участки микромагнитной съемки расположены в пределах рудопроявления Арваренч: один (ЮВ) – в юго-восточной части, другой (СЗ) – на северо-западе (рис. 1). При съемке измерялся модуль магнитной индукции T , а результаты представлялись в виде аномалий модуля T_a . Флуктуации, связанные с сильно намагниченными валунами внутри четвертичной морены, при обработке данных измерений подвергались фильтрации. При измерениях использовались портативные магнитометры МИНИМАГ и измеритель магнитной восприимчивости КТ-5. Вариации магнитного поля измерялись на контрольном пункте с интервалом 30 с. Значения вариаций в интервале между измерениями вычислялись с использованием линейной интерполяции. Погрешность съемки составила ± 10 нТл.

Результаты исследований

Петрофизические свойства по данным скважины 4391

Для оценки перспектив применения магнитной съемки были выполнены измерения магнитной восприимчивости керн скважины, пробуренной на месторождении Южная Сопча (таблица, рис. 2). Скважина 4391 пересекает более 200 м разреза норит-пироксенитовой зоны, сложенной тремя группами пород (рис. 2 и 3): 1) пироксениты (PX), 2) перидотиты (PD) и 3) такситовые мафитовые породы (TMR). Средняя величина магнитной восприимчивости ($k \times 10^{-3}$ ед. Си) для каждой группы составляет 10, 43 и 16 соответственно, а диапазоны вариаций перекрываются (таблица, рис. 3). Широкий интервал отклонения значений магнитной восприимчивости от среднего предполагает возможность наличия аномалий разной амплитуды (от десятков до сотен и тысяч нТл) даже для небольших по размерам тел внутри каждой группы пород. Однако поскольку перидотиты образуют относительно мощные тела с большими значениями k (рис. 2), эта группа пород с наибольшей вероятностью должна создавать высокоамплитудные аномалии. Далее по мере уменьшения "способности влиять" на аномальное поле следуют такситовые мафитовые породы и пироксениты. Пироксениты с высокими значениями k , как правило, располагаются в разрезе

вблизи такситовых мафитовых пород (рис. 2). Поэтому они также могут вносить свой вклад в формирование искомым аномалий, обусловленных жильными телами минерализованных ЭПГ такситовых мафитов.

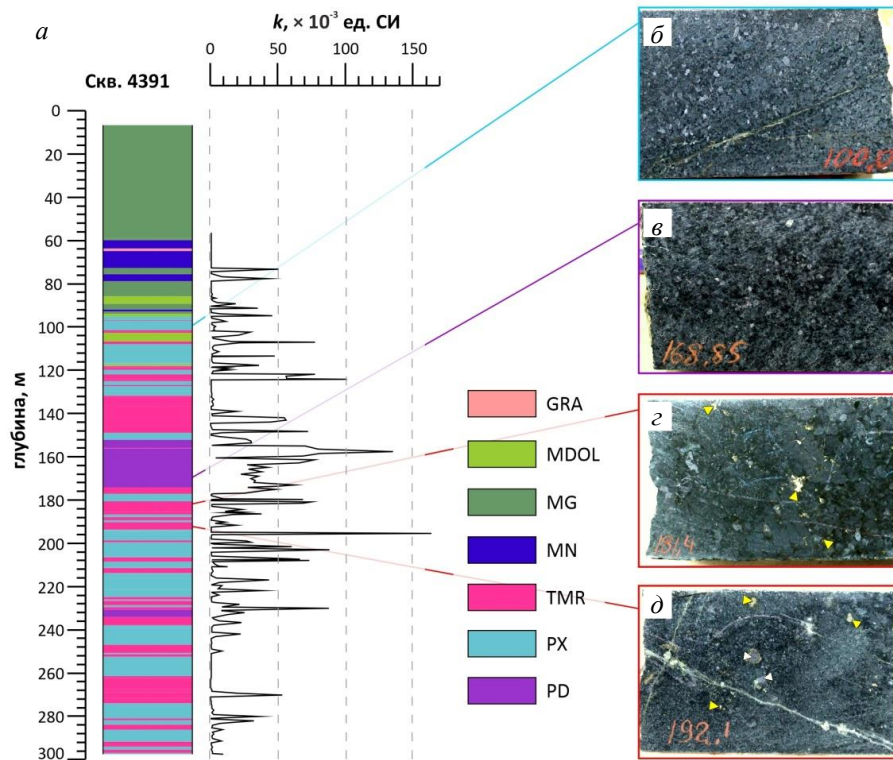


Рис. 2. *a* – упрощенная геологическая колонка по скважине 4391 с вариациями магнитной восприимчивости k . Породы разделены на те же группы, что и в таблице, за исключением гранитов (GRA); *б–д* – фотографии главных типов пород норит-пироксенитовой зоны Южносопчинского интрузива по скважине 4391: *б* – ортопироксенит плагиоклазовый, *в* – гарцбургит, *з* – пегматоидный меланорит, *д* – такситовый габбронорит. Диаметр керна 59 мм.

Сульфиды и магнетит показаны желтыми и белыми треугольниками соответственно
 Fig. 2. *a* – simplified geologic column for drill hole 4391 with magnetic susceptibility variations. The rocks are categorized into the same groups as in Table except granites (GRA); *б–д* – photographs of the main rock types of the norite-pyroxenite zone of the South Sopcha intrusion (drill hole 4391): *б* – plagioclase orthopyroxenite, *в* – harzburgite, *з* – pegmatoid melanorite, *д* – taxitic gabbro-norite. Drill core diameter is 59 mm. Sulfides and magnetite are shown by yellow and white triangles respectively

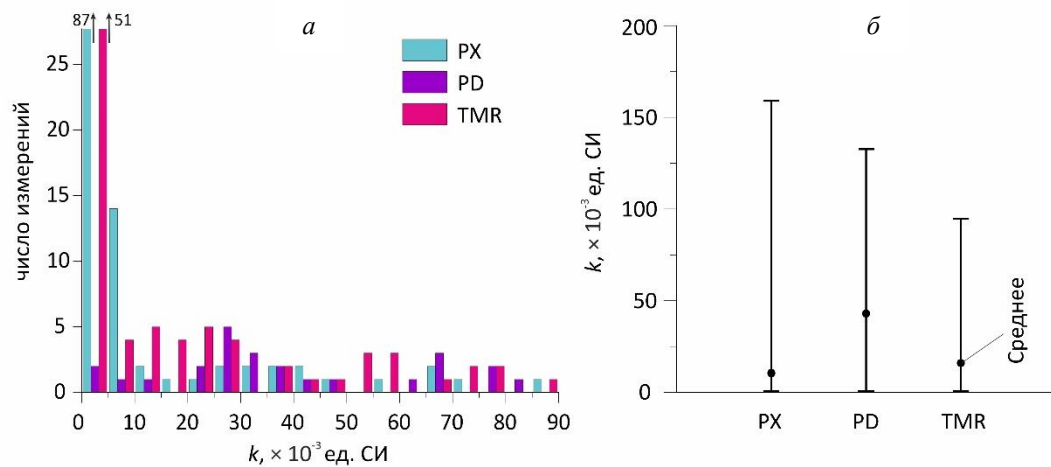


Рис. 3. Гистограммы распределения (*a*) и диапазон вариаций (*б*) магнитной восприимчивости (k) по главным типам пород норит-пироксенитовой зоны. Сокращения см. в таблице
 Fig. 3. Distribution histograms (*a*) and mean values (*б*) of magnetic susceptibility (k) for the main rock types of the norite-pyroxenite zone. See Table for abbreviations

Таблица. Средние значения магнитной восприимчивости ($k \times 10^{-3}$ ед. СИ)
 для пород Южносочинского интрузива по скважине 4391
 Table. Mean values of magnetic susceptibility ($k \times 10^{-3}$ SI units)
 for rocks of the South Sopcha intrusion from drill hole 4391

Порода	MDOL	MG	MN	PX	PD	TMR
Количество измерений	13	20	16	121	26	89
Минимальное значение k	0,6	0,2	0,3	0,3	0,9	0,2
Максимальное значение k	45,7	50,2	42,3	163,7	135,0	87,7
Среднее значение k	10,5	5,6	3,4	10,1	42,9	15,6

Примечание. MDOL – метадолериты; MG – метагаббро габбровой зоны; MN – метанориты габбровой зоны; PX – группа пироксенитов (массивные меланориты и ортопироксениты); PD – группа перидотитов (гарцбургиты, метаперидотиты); TMR – группа такситовых мафитовых пород (пегматоидные меланориты, габбронориты, кварцевые габбронориты, габбро-пегматиты и др.).

Сравнение результатов микромагнитной съемки Южносочинского массива с данными среднемасштабных измерений

Важнейшим параметром магнитной съемки является густота сети точек измерений. На практике всегда имеет место "конфликт интересов": количество получаемой информации против затрат ресурсов, которые почти всегда ограничены. При этом сеть наблюдений желательнее задавать таким образом, чтобы избежать эффектов, связанных с ее анизотропией. С этой целью сеть обычно задается в виде профилей, ортогональных азимуту простирания основных геологических структур участка. Шаг измерений по профилям должен соответствовать ширине предполагаемых аномалий так, чтобы определение положения максимумов и градиентов аномалий соответствовали масштабу исследований¹. В нашем случае при проектировании съемки использовались следующие априорные представления об искомых источниках аномального поля:

1) морфологическая модель образований с аномальной намагниченностью рассматривалась в виде линзообразных тел;

2) горизонтальная мощность этих тел – 2–3 м;

3) средняя глубина верхних кромок этих же тел – не более 3 м;

4) средний азимут простирания аномальных объектов – близок к 312°;

5) размеры аномальных линз по простиранию – от 5 до 50 м.

Исходя из указанных параметров, базовая сеть для СЗ участка была задана следующим образом:

а) направление профилей по азимуту 222°; б) расстояние между профилями $L = 4$ м; в) шаг измерений по профилю $d = 1$ м. Эти параметры, равно как $L = 5$ м и $d = 1$ м для ЮВ участка, соответствуют условиям микромагнитной съемки.

Оценить возможность экономии ресурсов при съемке можно экспериментально путем расчета потерь информации при разрядке сети с опорой на данные базовой сети. Для этого по результатам измерений была выполнена имитация разрядки сети профилей с шагами: для СЗ участка – $L_i = 8, 12, 16, 24, 32, 48, 96$ м; для ЮВ – $L_i = 10, 25, 50$ м. Значения поля для разреженных сетей использовались для получения значений поля в точках базовой сети с помощью линейной интерполяции (триангуляция в программе Surfer). Метод линейной интерполяции использован, поскольку он не требует задания каких-либо параметров по сравнению с другими методами. Потери информации за счет разрядки сети при этом оценивались по значению $S(L)$ в процентах (%)

$$S(L) = 100 \times \frac{\| \mathbf{T}_a - \mathbf{T}_{\text{инт}}(L) \|_2}{\| \mathbf{T}_a \|_2},$$

где $\| \mathbf{T}_a - \mathbf{T}_{\text{инт}}(L) \|_2$ – евклидова норма разности измеренного (\mathbf{T}_a) и интерполированного ($\mathbf{T}_{\text{инт}}(L)$) полей; $\| \mathbf{T}_a \|_2$ – евклидова норма измеренного поля базовой сети.

На рис. 4 показаны кривые потерь информации для обоих участков в виде значений $S(L)$, изменяющихся в зависимости от шага между профилями при разрежении сети. Из рассмотрения графиков следует вывод о том, что оба участка характеризуются весьма близкой морфологией аномального магнитного поля. Морфологические особенности аномального поля этих участков, таким образом, можно рассматривать как характерные для всей норит-пироксенитовой зоны Южносочинского массива. Потери информации при разрежении сети могут быть обусловлены двумя факторами: 1) изменчивостью азимутов простирания аномальных объектов и 2) изометричностью формы или ограниченностью размеров этих же объектов по простиранию.

Как следует из поведения графиков (рис. 4), потери информации возрастают с увеличением шага между профилями. Это обстоятельство может приводить к искажению морфологии магнитных аномалий. Характер потерь информации наглядно показан на рис. 5, где аномальные поля базовой сети сравниваются с полями после разрядки до $L = 24$ –25. Потери в этом случае превышают 50 % (рис. 4). Карты с разреженной

¹ Магниторазведка. Справочник геофизика / под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. М. : Недра, 1980. 367 с.

сеть профилей лишены целого ряда положительных аномалий как линейных, так и изометричных (сравн. рис. 5, в, з).

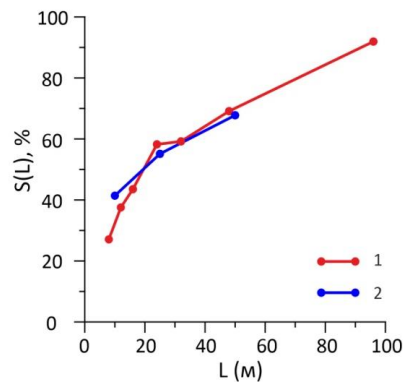


Рис. 4. Графики параметра S в зависимости от расстояния между профилями L .
 Кривая 1 – СЗ участок; кривая 2 – ЮВ участок
 Fig. 4. Plots of the parameter S as a function of the distance between profiles L .
 Curve 1, NW site; Curve 2, SE site

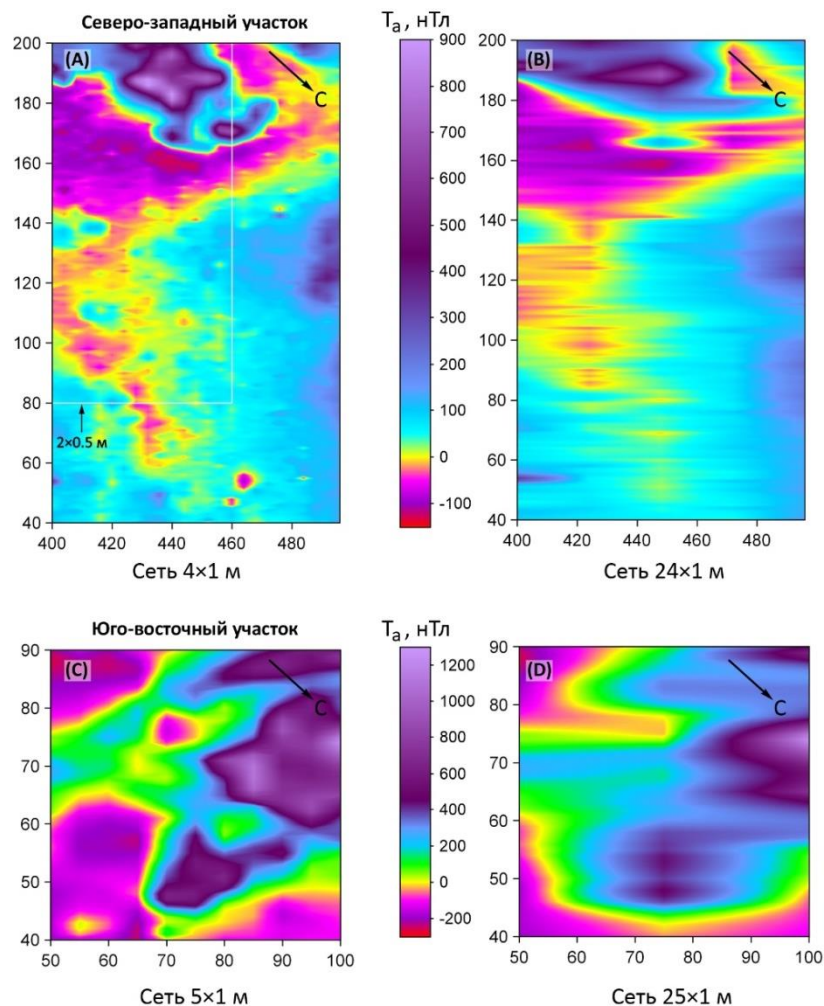


Рис. 5. Карты-схемы аномального магнитного поля для базовых (а, в) и разреженных (б, з) сетей
 Fig. 5. Maps of abnormal magnetic field in the base (a, v) and discharged (b, z) grids

Сгущение сети относительно базовой даст незначительный прирост информации, поскольку расстояние между профилями будет в большинстве случаев сопоставимо с мощностью перекрывающих рыхлых отложений. Выполненное при полевых работах сгущение до $2 \times 0,5$ м (рис. 5, а) показало, что потери при интерполяции сети 4×1 м составляют 5 % и сопоставимы с погрешностью съемки. Несмотря на то, что

сгущение способствует более адекватному отражению аномального поля, такое увеличение детальности для Южносопчинского массива является нерациональным с точки зрения отношения количества новой информации к затраченным ресурсам. Таким образом, используемые нами базовые сети (4×1 м, 5×1 м) можно рассматривать как оптимальные для изучения структурных особенностей норит-пироксенитовой рудоносной зоны этого массива.

Обсуждение и результаты

Существующая геологическая карта проявления Арваренч, построенная преимущественно по данным бурения, является весьма схематичной. На карте отражены лишь преобладающие в норит-пироксенитовой зоне ортопироксениты и рудные тела (рис. 6, а; 7, а). Сравнение фрагментов карт на рис. 6 и 7 с данными микромагнитной съемки ясно показывает, что строение рудоносной зоны может быть уточнено. Например, на геологической карте СЗ участка показаны три группы пород: гнейсы архейского фундамента, пироксениты и такситовые мафиты с платинометальной минерализацией, выделенные как предполагаемые рудные тела (рис. 6). Контакт с архейскими породами, видимый на ЮВ участке (рис. 7, б) по понижению уровня поля, на СЗ участке не выделяется (рис. 6, б), располагаясь далее к северо-востоку. Уже при первом рассмотрении карты аномального магнитного поля (рис. 6, б) на участке могут быть выделены девять положительных и четыре отрицательных аномалии изометричного и линейного облика (рис. 6, в). Изометричные положительные аномалии 1–2, предположительно, связаны с перидотитами. Для этих аномалий характерны внутренние максимумы до 900 нТл (а, б, с и т. д.). Изометричные, преимущественно неширокие положительные аномалии 3–9, вероятно, связаны с такситовыми минерализованными породами. Отрицательные аномалии участка представлены узкими зонами предполагаемых разломов, проходящих вдоль линий 1–3 (рис. 6, в). Образование этих аномалий может объясняться повторным намагничиванием пород или преобразованием и разрушением магнитных минералов в процессе метаморфизма. Линейная аномалия 4, очевидно, является комплементарным минимумом, связанным с положительной аномалией, индуцированной перидотитами (1–2).

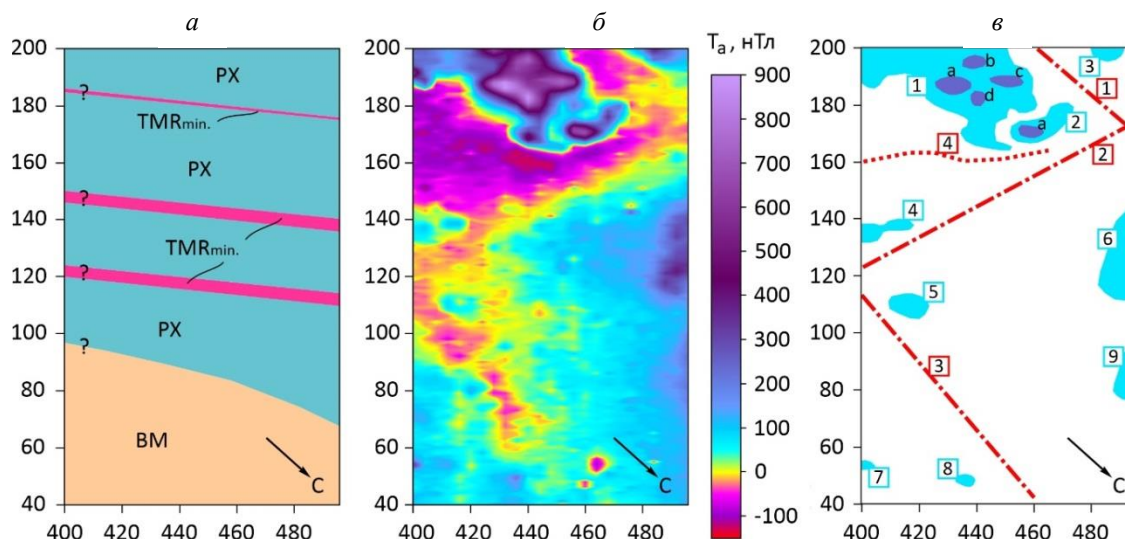


Рис. 6. СЗ участок рудопроявления Арваренч: а – геологическая схема участка по данным карты В. Н. Иванченко (2009); б – карта-схема аномального магнитного поля, составленная в рамках профилей от 400 до 496 и пикетов от 40 до 200. Сеть 4×1 м; в – изометричные и линейные аномалии, выделенные на основе карты б и пронумерованные в соответствии со своим знаком. См. пояснения в тексте.

Сокращения: BM – породы архейского фундамента,

PX – пироксениты, TMR_{min} – минерализованные такситовые мафитовые породы

Fig. 6. NW site of the Arvarench PGE occurrence: а – geological scheme of the site according to the map data of V. N. Ivanchenko (2009); б – map of abnormal magnetic field drawn within lines from 400 to 496 and points from 40 to 200. 4×1 m grid; в – isometric and linear anomalies extracted from the map б and numbered according to their sign. See explanations in the text. Abbreviations: BM, Archean basement rocks; PX, pyroxenites; TMR_{min}, mineralized taxitic mafic rocks

Хотя анализ всей площади ЮВ участка выходит за рамки настоящей статьи, интересно отметить две его главные черты в магнитном поле. Первая из них определяется линейной высокоамплитудной положительной аномалией, расположенной над основанием габбровой зоны. Судя по данным (Pripachkin et al., 2016), в основании габбровой зоны развита магматическая брекчия, содержащая обломки высокомагнитных метаноритов, отмеченных также и в скважине 4391 (рис. 2). Эта аномалия достигает величины 3 600 нТл и характеризует наиболее интенсивное поле над интрузивом. Вторая черта связана с линейной отрицательной

аномалией изогнутой формы, маркирующей положение контакта с архейскими породами и отраженной также на участке детализации (рис. 7, а–в, аномалии 5L и 6L). Участок микромагнитной съемки (рис. 7, в) как бы зажат между этими аномалиями и показывает строение только норит-пироксенитовой зоны (рис. 7, б). Детализация выявляет внутри этой зоны диагональные вытянутые положительные аномалии 1 и 3 (рис. 7, з), связанные, вероятно, с минерализованными жилами такситовых пород. Как показывает широкая положительная аномалия 2, осложненная более узкими максимумами, перидотиты также участвуют в строении норит-пироксенитовой зоны на этом участке (сравн. рис. 6, б, в и 7, в, з). Кроме этого, на ЮВ участке проявлены отрицательные аномалии изометричной формы (1–4). Интерпретация этих аномалий требует дополнительных исследований.

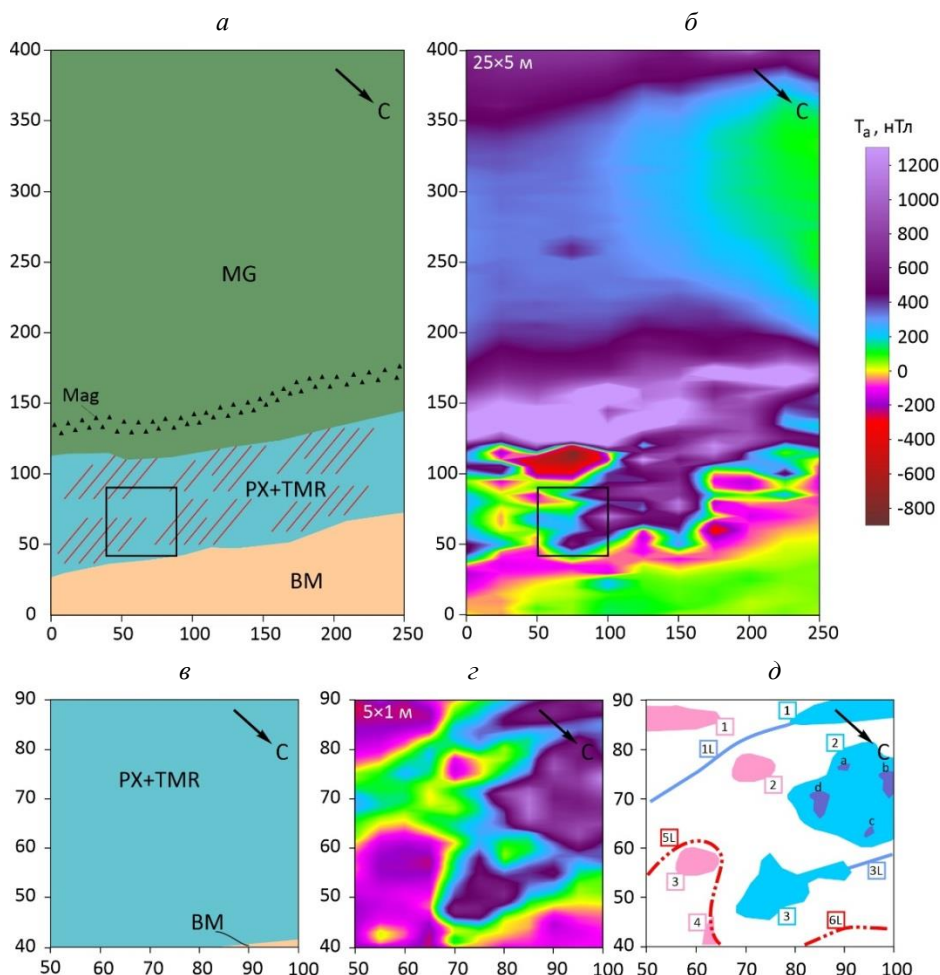


Рис. 7. Юго-восточный участок рудопроявления Арваренч: а – геологическая схема участка по данным карты В. Н. Иванченко (2009 г.), в – ее фрагмент. Красные линии указывают на ЭПГ минерализацию, распространенную по всей мощности норит-пироксенитовой зоны; б – карта-схема аномального магнитного поля, составленная в рамках профилей от 0 до 250 и пикетов от 0 до 400. Сеть 25×5 м. Диапазон значений dB составляет от –900 до 3 600 нТл; з – карта-схема аномального магнитного поля, составленная в рамках профилей от 50 до 100 и пикетов от 40 до 90. Сеть 5×1 м; д – изометричные и линейные аномалии, выделенные на основе карты (з)

и пронумерованные в соответствии со своим знаком и типом. См. пояснения в тексте. Сокращения: BM – породы архейского фундамента, Mag – уровень обогащения пород габбровой зоны магнетитом, MG – метагаббро, PX – пироксениты, TMR – такситовые мафитовые породы

Fig. 7. SE site of the Arvarech PGE occurrence: а – geological scheme of the site according to the map data of V. N. Ivanchenko (2009), and в – its fragment. Red lines show PGE mineralization distributed throughout the thickness of the norite-pyroxenite zone; б – map of abnormal magnetic field drawn from line 0 to line 250 and from point 0 to point 400. The grid is 25×5 m. The range of dB values is from –900 to 3 600 nTl; з – abnormal magnetic field map drawn from line 50 to line 100 and from point 40 to point 90. The grid is 5×1 m; д – isometric and linear anomalies extracted from map (з) and numbered according to their sign and type. See explanations in the text. Abbreviations: BM, Archean basement rocks; Mag, level of enrichment of gabbroic zone rocks with magnetite; MG, metagabbro; PX, pyroxenites; TMR, taxitic mafic rocks

Таким образом, проведенные работы на опорных участках (рис. 6 и 7) наглядно показывают, что микромагнитная съемка является эффективным методом выявления деталей геологического строения норит-пироксенитовой зоны Южносопчинского массива. В перспективе проведение микромагнитной съемки может помочь не только проявить структуру "линейного штокверка", очертить тела перидотитов вместе с зонами разломов, но даст, кроме этого, возможность количественной интерпретации аномального поля с целью установления параметров глубинного строения массива.

Заключение

Проведенные опыты по детализации исследований магнитного поля над Южносопчинским платиноносным массивом позволяют сделать следующие выводы.

1. Южносопчинский массив, вмещающий два рудных объекта ЭПГ (месторождение Южная Сопча и проявление Арваренч), является с геологической точки зрения недостаточно изученным, в особенности – в отношении внутреннего строения норит-пироксенитовой зоны с платинометальным оруденением. Характер аномального магнитного поля указывает на возможность уточнения геологического строения этой зоны за счет детальных исследований.

2. Данные микромагнитной съемки, которая была выполнена в Кольском регионе впервые, показывают, что над норит-пироксенитовой зоной, помимо нижнего контакта интрузива с архейскими гнейсами, могут выделяться:

а) перидотиты, с которыми, по-видимому, связаны широкие положительные аномалии большой амплитуды;

б) жильные такситовые мафитовые породы, содержащие вкрапленность сульфидов и магнетита и образующие среднеамплитудные положительные аномалии изометричной и линейной формы;

в) зоны, выраженные линейными отрицательными аномалиями и возможно связанные с проявлением тектоники.

3. Для адекватного отражения аномального магнитного поля норит-пироксенитовой зоны следует применять сеть с плотностью измерений порядка 5×1 м, что соответствует параметрам микромагнитной съемки. Очевидно, что в пределах этой зоны могут существовать участки, важные черты геологического строения которых проявятся при продолжении исследований.

Анализ существующего задела для Кольского региона, включая результаты этой статьи, показывает, что микромагнитная съемка в сочетании с детальной магнитометрией может использоваться для геологического картирования расслоенных интрузивов и поисков ЭПГ оруденения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004. Критические замечания канд. геол.-минер. наук В. В. Чащина, канд. геол.-минерал. наук П. В. Припачкина и канд. геол.-минерал. наук Т. В. Рундквист привели к значительному улучшению качества рукописи. Авторы благодарят П. А. Маурчева за помощь при полевых работах, а также рецензентов за конструктивное прочтение рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Балабонин Н. Л., Корчагин А. У., Субботин В. В., Нерадовский Ю. Н. [и др.]. Минералы платиновых металлов и новые данные о главных минералах руд Федорово-Панского массива // Вестник МГТУ. 2000. Т. 3, № 2. С. 179–204. EDN: ПУАУJ.
- Гребнев Р. А., Рундквист Т. В., Припачкин П. В. Геохимия основных пород платиноносного массива Вурэчуайвенч (Мончегорский комплекс, Кольский регион) // Геохимия. 2014. № 9. С. 791–806. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752514070024>. EDN: SJDGXZ.
- Гроховская Т. Л., Бакаев Г. Ф., Шолохнев В. В., Лапина М. И. [и др.]. Рудная платинометальная минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 4. С. 329–352. EDN: OTUUIID.
- Гроховская Т. Л., Иванченко В. Н., Каримова О. В., Грибоедова И. Г. [и др.]. Геологическое строение, минералогия и генезис ЭПГ-минерализации массива Южная Сопча, Мончегорский комплекс, Россия // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54, № 5. С. 416–440. EDN: PCNIBP.
- Грошев Н. Ю. Двухфазный платиноносный массив Федоровой тундры (Кольский полуостров): геология и типы малосульфидного ЭПГ-оруденения : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Апатиты, 2010. 24 с.
- Грошев Н. Ю., Припачкин П. В., Karykowski V. T., Малыгина А. В. [и др.]. Генезис магнетитового пласта массива Габбро-10, Мончегорский комплекс, Кольский регион: данные U-Pb SHRIMP-II датирования метадиоритов // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 6. С. 546–557. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016777018060023>. EDN: VLZZYN.

- Грошев Н. Ю., Бороздина С. В. Применение магниторазведки при поисках малосульфидных платиновых руд на примере проявления риф Невидимый (массив Федоровой тундры, Кольский полуостров) // Геология и геоэкология: исследования молодых : материалы XXII конф. молодых ученых, посвященной памяти члена-корреспондента проф. К. О. Кратца, г. Апатиты, 8–10 ноября 2011 г. Апатиты : Изд-во КНЦ, 2011. С. 9–10.
- Козлов Е. К. Естественные ряды пород никеленосных интрузий и их металлогения. Л. : Наука, 1973. 288 с.
- Мирошникова Я. А., Чернявский А. В., Базай А. В. Рудная минерализация участка Южносопчинский-1 (Мончегорский рудный район, Кольский полуостров) // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148, № 1. С. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1481.03>. EDN: ONHGUX.
- Нерадовский Ю. Н., Грошев Н. Ю., Войтеховский Ю. Л., Бороздина С. В. [и др.]. О минералах платины, палладия, серебра и золота в Порьереченском титаноносном комплексе (Кольский полуостров) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 3(9). С. 71–87. EDN: ZXIWN.
- Нерадовский Ю. Н., Рундквист Т. В., Галкин А. С., Климентьев В. Н. К проблеме платиноносности рудного "пласта-330" г. Сопча и его промышленного использования (Мончегорский плутон) // Вестник МГТУ. 2002. Т. 5, № 1. С. 85–90. EDN: ПУBLR.
- Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / под ред. Ф. П. Митрофанова, В. Ф. Смолькина : в 2 ч. Ч. 1. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. 177 с.
- Рыбникова Я. А., Рундквист Т. В. Малосульфидные платинометалльные месторождения в Кольском регионе: сравнительный анализ Южносопчинского рудопоявления и месторождения Федорова Тундра // Литосфера. 2024. Т. 24, № 1. С. 147–172. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-1-147-172>. EDN: EPXYTO.
- Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорова-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1(8). С. 54–65. EDN: PBIHXX.
- Чашин В. В., Иванченко В. Н. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидные Pt-Pd руды Мончегорского рудного района (западный сектор Арктики): геологическая характеристика, минералого-геохимические и генетические особенности // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 4. С. 622–650. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig2021184>. EDN: SVERKV.
- Чашин В. В., Митрофанов Ф. П. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минерагения // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 1. С. 231–256. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126>. EDN: SFQYXD.
- Шарков Е. В., Чистяков А. В. Геолого-петрологические аспекты ЭПГ-Cu-Ni-оруденения в раннепалеопротерозойском Мончегорском расслоенном мафит-ультрамафитовом комплексе (Кольский полуостров) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56, № 3. С. 171–194. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016777014030046>. EDN: SEPZPR.
- Chashchin V. V., Galkin A. S., Ozeryanskii V. V., Dedyukhin A. N. Sopcha Lake chromite deposit and its platinum potential, Monchegorsk Pluton, Kola Peninsula (Russia) // *Geology of Ore Deposits*. 1999. Vol. 41, N 6. P. 460–468.
- Grokhovskaya T. L., Vymazalová A., Laufek F., Stanley C. J. [et al.]. Palladothallite, Pd₃Tl, a new mineral from the Monchetundra layered intrusion, Kola Peninsula, Russia // *The Canadian Mineralogist*. 2021. Vol. 59, Iss. 6. P. 1821–1832. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.2100002>.
- Groshev N. Y., Rundkvist T. V., Karykowski B. T., Maier W. D. [et al.]. Low-sulfide platinum-palladium deposits of the paleoproterozoic Fedorova-Pana layered complex, Kola Region, Russia // *Minerals*. 2019. Vol. 9, Iss. 12. Article number: 764. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9120764>.
- Karykowski B. T., Maier W. D., Groshev N. Y., Barnes S. J. [et al.]. Origin of reef-style PGE mineralization in the paleoproterozoic Monchegorsk complex, Kola Region, Russia // *Economic Geology*. 2018a. Vol. 113, N 6. P. 1333–1358. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4594>.
- Karykowski B. T., Maier W. D., Groshev N. Y., Barnes S. J. [et al.]. Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: Evidence from the paleoproterozoic Monchegorsk complex, Kola Region, Russia // *Economic Geology*. 2018b. Vol. 113, N 4. P. 911–935. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4576>.
- Mokrushin A. V., Smol'kin V. F. Chromite mineralization in the Sopchezero deposit (Monchegorsk layered intrusion, Fennoscandian Shield) // *Minerals*. 2021. Vol. 11, N 7. P. 772. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070772>.
- Mudruk S. V., Balagansky V. V., Raevsky A. B., Rundkvist O. V. [et al.]. Complex shape of the palaeoproterozoic Serpovidny refolded mega-sheath fold in northern Fennoscandia revealed by magnetic and structural data // *Journal of Structural Geology*. 2022. Vol. 154. Article number: 104492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104492>.

- Pripachkin P. V., Rundkvist T. V., Miroshnikova Y. A., Chernyavsky A. V. [et al.]. Geological structure and ore mineralization of the South Sopchinsky and Gabbro-10 massifs and the Moroshkovoe Lake target, Monchegorsk area, Kola Peninsula, Russia // *Mineralium Deposita*. 2016. Vol. 51. P. 973–992. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0605-0>.
- Raevsky A. B., Mudruk S. V., Balagansky V. V., Rundkvist O. V. Reconstructing the shape of large synformal folds based on the solution of the 2D non-linear magnetic inverse problem // *Tectonophysics*. 2019. Vol. 754. P. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.02.001>.
- Subbotin V. V., Vymazalová A., Laufek F., Savchenko Y. E. [et al.]. Mitrofanovite, Pt₃Te₄, a new mineral from the East Chuavry deposit, Fedorovo-Pana intrusion, Kola Peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 83, Iss. 4. P. 523–530. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.150>.
- Vymazalová A., Subbotin V. V., Laufek F., Savchenko Y. E. [et al.]. Panskyite, Pd₉Ag₂Pb₂S₄, a new platinum group mineral from the Southern Kievev ore occurrence of the Fedorova-Pana layered intrusion, Kola Peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2021. Vol. 85, Iss. 2. P. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.100>.

References

- Balabonin, N. L., Korchagin, A. U., Subbotin, V. V., Neradovsky, Yu. N. et al. 2000. Platinum metal minerals and new data on the main minerals of the Fedorovo-Pansky massif ores. *Vestnik of MSTU*, 3(2), pp. 179–204. EDN: IYAUJ. (In Russ.)
- Grebnev, R. A., Rundkvist, T. V., Pripachkin, P. V. 2014. Geochemistry of mafic rocks of the PGE-bearing Vurechuaivench massif (Monchegorsk complex, Kola Region). *Geohimiya*, 9, pp. 791–806. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752514070024>. EDN: SJDGXZ. (In Russ.)
- Grokhovskaya, T. L., Bakaev, G. F., Sholokhnev, V. V., Lapina, M. I. et al. 2003. The PGE ore mineralization in the Monchegorsk magmatic layered complex (Kola Peninsula, Russia). *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*, 45(4), pp. 329–352. EDN: OTUUIID. (In Russ.)
- Grokhovskaya, T. L., Ivanchenko, V. N., Karimova, O. V., Griboyedova, I. G. et al. 2012. Geology, mineralogy, and genesis of PGE mineralization in the South Sopcha massif, Monchegorsk complex, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 54(5), pp. 416–440. EDN: PCNIBP. (In Russ.)
- Groshev, N. Yu. 2010. Two-phase platinum-bearing Fedorova Tundra massif (Kola Peninsula): Geology and types of low-sulfide PGE mineralization. Abstract of Ph.D. dissertation. Apatity. (In Russ.)
- Groshev, N. Yu., Pripachkin, P. V., Karykowski, B. T., Malygina, A. V. et al. 2018. Genesis of a magnetite layer in the Gabbro-10 intrusion, Monchegorsk complex, Kola Region: U–Pb SHRIMP-II dating of metadiorites. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*, 60(6), pp. 546–557. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0016777018060023>. EDN: VLZZYN. (In Russ.)
- Groshev, N. Yu., Borozdina, S. V. 2011. Application of magnetic survey in the prospection for low-sulfide platinum ores using the example of the Invisible Reef (Fedorova Tundra massif, Kola Peninsula). *Proceedings of the XXII youth conference dedicated to the memory of K. O. Krats*, Apatity, 8–10 November, 2011. Apatity, pp. 9–10. (In Russ.)
- Kozlov, E. K. 1973. Natural series of nickel-bearing intrusions and their metallogeny. Leningrad. (In Russ.)
- Miroshnikova, Ya. A., Chernyavsky, A. V., Bazay, A. V. 2019. Ore mineralization of the Yuzhnosopchinsky-1 site (Monchegorsk ore region, Kola Peninsula). *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 148(1), pp. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1481.03>. EDN: ONHGUX. (In Russ.)
- Neradovsky, Yu. N., Groshev, N. Yu., Voitekhovskiy, Yu. L., Borozdina, S. V. et al. 2017. Minerals of platinum, palladium, silver and gold in the Por'erechensky titaniferous complex (Kola Peninsula). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 3(9), pp. 71–87. EDN: ZXIWNN. (In Russ.)
- Neradovsky, Yu. N., Rundkvist, T. V., Galkin, A. S., Klimentyev, V. N. 2002. On the problem of platinum fertility of the ore "Layer-330" of the Sopcha Mountain and its industrial use (Monchegorsk pluton). *Vestnik of MSTU*, 5(1), pp. 85–90. EDN: IYBLR. (In Russ.)
- Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: Petrology, mineralization, isotopy, deep structure. Part 1. 2004. Eds. F. P. Mitrofanov, V. F. Smolkin. Apatity. (In Russ.)
- Rybnikova, Ya. A., Rundkvist, T. V. 2024. Low-sulfide platinum metal deposits in the Kola Region: Comparative analysis of the Yuzhnosopchinskoye ore occurrence and the Fedorova Tundra deposit. *Lithosphere*, 24(1), pp. 147–172. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2024-24-1-147-172>. EDN: EPXYTO. (In Russ.)
- Subbotin, V. V., Korchagin, A. U., Savchenko, Y. E. 2012. Platinum metal mineralization of the Fedorovo-Pana ore cluster: Types of mineralization, mineral composition, features of genesis. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 1(8), pp. 54–65. EDN: PBIHZX. (In Russ.)
- Chashchin, V. V., Ivanchenko, V. N. 2022. Sulfide PGE-Cu-Ni and low-sulfide Pt-Pd ores of the Monchegorsk ore region (western sector of the Arctic): Geological characteristics, mineralogical-geochemical and genetic features. *Russian Geology and Geophysics*, 63(4), pp. 622–650. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig2021184>. EDN: SVERKV. (In Russ.)

- Chashchin, V. V., Mitrofanov, F. P. 2014. Paleoproterozoic Imandra-Varzuga rift structure (the Kola Peninsula): Intrusive magmatism and minerageny. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(1), pp. 231–256. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126>. EDN: SFQYXD. (In Russ.)
- Sharkov, E. V., Chistyakov, A. V. 2014. Geological and petrological aspects of Ni-Cu-PGE mineralization in the early paleoproterozoic Monchegorsk layered mafic-ultramafic complex, Kola Peninsula. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*, 56(3), pp. 171–194. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016777014030046>. EDN: SEPZPR. (In Russ.)
- Chashchin, V. V., Galkin, A. S., Ozeryanskii, V. V., Dedyukhin, A. N. 1999. Sopcha Lake chromite deposit and its platinum potential, Monchegorsk Pluton, Kola Peninsula (Russia). *Geology of Ore Deposits*, 41(6), pp. 460–468.
- Grokhovskaya, T. L., Vymazalová, A., Laufek, F., Stanley, C. J. et al. 2021. Palladothallite, Pd₃Tl, a new mineral from the Monchetundra layered intrusion, Kola Peninsula, Russia. *The Canadian Mineralogist*, 59(6), pp. 1821–1832. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.2100002>.
- Groshev, N. Y., Rundkvist, T. V., Karykowski, B. T., Maier, W. D. et al. 2019. Low-sulfide platinum-palladium deposits of the paleoproterozoic Fedorova-Pana layered complex, Kola Region, Russia. *Minerals*, 9(12). Article number: 764. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9120764>.
- Karykowski, B. T., Maier, W. D., Groshev, N. Y., Barnes, S. J. et al. 2018a. Origin of reef-style PGE mineralization in the paleoproterozoic Monchegorsk complex, Kola Region, Russia. *Economic Geology*, 113(6), pp. 1333–1358. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4594>.
- Karykowski, B. T., Maier, W. D., Groshev, N. Y., Barnes, S. J. et al. 2018b. Critical controls on the formation of contact-style PGE-Ni-Cu mineralization: Evidence from the paleoproterozoic Monchegorsk complex, Kola Region, Russia. *Economic Geology*, 113(4), pp. 911–935. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4576>.
- Mokrushin, A. V., Smol'kin, V. F. 2021. Chromite mineralization in the Sopchezero deposit (Monchegorsk layered intrusion, Fennoscandian Shield). *Minerals*, 11(7), pp. 772. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070772>.
- Mudruk, S. V., Balagansky, V. V., Raevsky, A. B., Rundkvist, O. V. et al. 2022. Complex shape of the palaeoproterozoic Serpovidny refolded mega-sheath fold in northern Fennoscandia revealed by magnetic and structural data. *Journal of Structural Geology*, 154. Article number: 104492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104492>.
- Pripachkin, P. V., Rundkvist, T. V., Miroshnikova, Y. A., Chernyavsky, A. V. et al. 2016. Geological structure and ore mineralization of the South Sopchinsky and Gabbro-10 massifs and the Moroshkovoe Lake target, Monchegorsk area, Kola Peninsula, Russia. *Mineralium Deposita*, 51, pp. 973–992. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0605-0>.
- Raevsky, A. B., Mudruk, S. V., Balagansky, V. V., Rundkvist, O. V. 2019. Reconstructing the shape of large synformal folds based on the solution of the 2D non-linear magnetic inverse problem. *Tectonophysics*, 754, pp. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.02.001>.
- Subbotin, V. V., Vymazalová, A., Laufek, F., Savchenko, Y. E. et al. 2019. Mitrofanovite, Pt₃Te₄, a new mineral from the East Chuarvy deposit, Fedorovo-Pana intrusion, Kola Peninsula, Russia. *Mineralogical Magazine*, 83(4), pp. 523–530. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.150>.
- Vymazalová, A., Subbotin, V. V., Laufek, F., Savchenko, Y. E. et al. 2021. Panskyite, Pd₉Ag₂Pb₂S₄, a new platinum group mineral from the Southern Kievev ore occurrence of the Fedorova-Pana layered intrusion, Kola Peninsula, Russia. *Mineralogical Magazine*, 85(2), pp. 161–171. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.100>.

Сведения об авторах

Грошев Николай Юрьевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: n.groshev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-4387>

Nikolay Yu. Groshev – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.&Miner.), Leading Researcher;
e-mail: n.groshev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6956-4387>

Сущенко Артем Максимович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, аспирант;
e-mail: a.sushchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9153-9076>

Artyom M. Sushchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Ph.D. Student;
e-mail: a.sushchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9153-9076>

Раевский Алексей Борисович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: a.raevskiy@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6850-2850>

Alexey B. Raevsky – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Senior Researcher;
e-mail: a.raevskiy@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6850-2850>

Иванов Антон Николаевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, вед. инженер; e-mail: a.ivanov@ksc.ru

Anton N. Ivanov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Leading Engineer; e-mail: a.ivanov@ksc.ru

Чернявский Алексей Викторович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, науч. сотрудник;
e-mail: a.chernyavsky@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9639-5423>

Alexey V. Chernyavsky – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Researcher;
e-mail: a.chernyavsky@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9639-5423>