

УДК 553.411.071

Магнитная неоднородность минерализованной зоны месторождения Благодатное (Енисейский край)

В.Г. Федоров, Ю.В. КолмаковНациональный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Томск, пр. Ленина 30, Российская Федерация. E-mail: vgf2@tpu.ru*(Статья поступила в редакцию 08 ноября 2024 г.)*

Кратко рассмотрена история геодинамического развития Енисейского края с позиции суперконтинентальных циклов. Описаны геологическое строение золотосульфидного месторождения Благодатное и этапы его гидротермально-метасоматической эволюции. Детально охарактеризована магнитная структура минерализованной зоны. Установлена связь составов пирита и пирротина с магнитной неоднородностью пирит-пирротинового парагенезиса и распределением золотой минерализации в рудной зоне.

Ключевые слова: *Енисейский край, месторождение Благодатное, магниторазведка, пирит-пирротинный парагенезис.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.1.62

Геодинамическая обстановка Енисейского края

Большинством исследователей Енисейский край рассматривается в качестве аккреционно-коллизивной структуры юго-западного складчатого обрамления Сибирского кратона. Месторождение Благодатное находится в осевой части Центрального блока заангарской части Енисейского края. Датировки золоторудных образований подавляющего большинства месторождений, входящих в его состав, не моложе позднепротерозойских (Ножкин и др., 2011), этим определяется ограничение краткого описания его геологической истории. Этапы его литосферного развития рассматриваются в рамках концепции суперконтинентальных циклов в связи с процессами формирования и распада суперконтинента Родиния (Лиханов, Ножкин, Ревердатто и др.).

1. В позднем палеопротерозое в длительную эпоху тектонической стабилизации происходило формирование континентальных кор выветривания с последующим их переотложением в шельфовой зоне южного обрамления палеоконтинента и образованием кремнисто-карбонатных и высокоглиноземистых пород тейской серии.

2. Рифтогенез раннего мезопротерозоя привел к формированию вулканогенно-терригенных осадочных пород сухопитской серии (кординской, горбилковской и удерейской свит) с характерной повышенной фоновой золотоносностью углеродистых сланцев в их составе и заметным вкладом глубинного вещества. Накопление осадков происходило в погружающейся вдоль Татарского и Ишимбинского глубинных разломов перикратонной зоне. Для подавляющего большинства золоторудных месторождений Енисейского края породы перечисленных свит являются рудовмещающими.

3. В раннем неопротерозое литосферное развитие Енисейского края происходило в коллизивной обстановке. Сам край на сегодняшний день рассматривается как фрагмент образований гренвильской орогении, связанной с формированием суперконтинента Родиния. Признаками раннего этапа орогенеза считаются ареалы регионально метаморфизованных пород от зеленосланцевой до амфиболитовой фации с гранитоидными куполами тейского комплекса; признаками позднего этапа – гранитоиды каламинского типа и надвижки с зонами локального динамометаморфизма.

© Федоров В.Г., Колмаков Ю.В., 2025



Эта работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

4. В позднем неопротерозое в связи с распадом суперконтинента Родиния режим сжатия сменился режимом растяжения. Вдоль систем Татарского и Ишимбинского разломов неоднократно был проявлен магматизм в обстановке рифтогенеза: формировались прогибы с несогласным залеганием терригенно-вулканогенных отложений на более древних образованиях; синхронно этому происходило образование поясов даек бимодального состава ковригинского и щелочного состава захребтинского комплексов; последовательное внедрение гранитных интрузий аяхтинского и кутукасского комплексов.

5. Завершается неопротерозойский магматизм Центрального блока Енисейского кряжа формированием ультраосновных щелочных пород среднетатарского и чапинского комплекса, приразломных карбонатитов жильной фации и субщелочных лейкогранитов Татарского массива.

Геологическое строение месторождения Благодатное

Месторождение развито в отложениях рязановской свиты тейской серии и кординской свиты сухопитской серии. Осадочные толщи претерпели региональный метаморфизм низких давлений на уровне эпидот-амфиболитовой фации в раннем неопротерозое. Структурный контроль оруденения осуществляется фрагментом Борзцовской системы синколлизии надвигов, сформированной на рубеже раннего и позднего неопротерозоя. Рудную минерализацию вмещает сбрососдвиговое нарушение, заложенное в позднем неопротерозое среди зон локального дислокационного метаморфизма синколлизии надвиговой структуры (Колмаков, Сазонов, 2022).

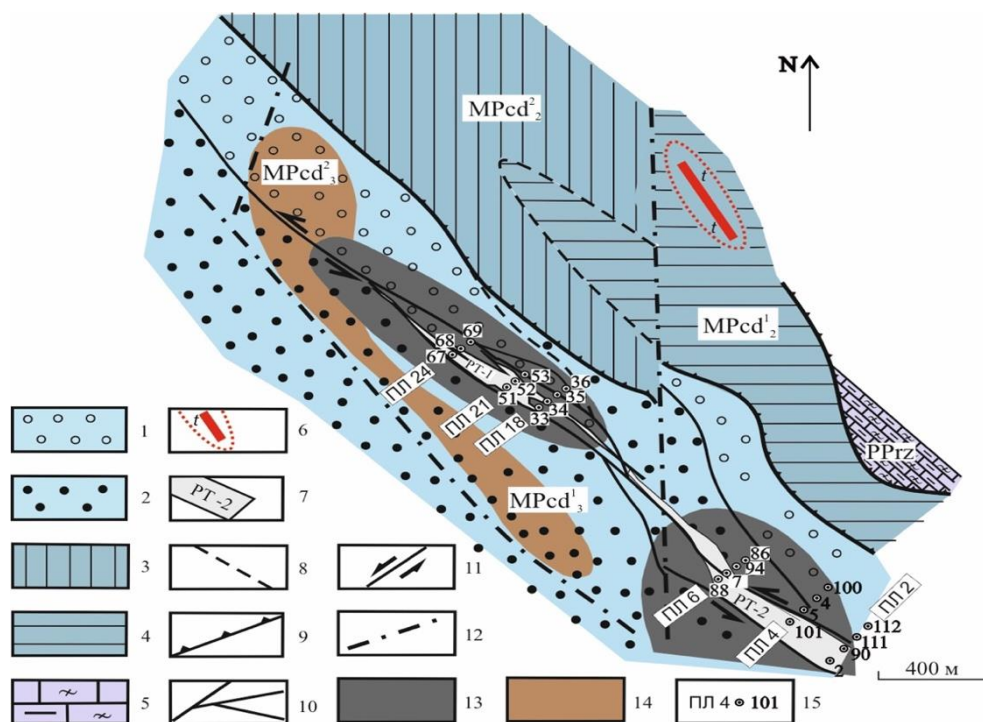


Рис. 1. Геологическая схема месторождения Благодатное: 1–2 – верхнекординская подсвита (MPcd3): гранат-двуслюдяные сланцы (1) и ставролитовые метапелиты (2); 3–4 – среднекординская подсвита (MPcd2): кварцитовидные сланцы (3) и аркозовые метаалевролиты (4); 5 – рязановская свита (PPrz) – кальцифиры; 6 – дайка гранит-порфиров и сопровождающий ареал турмалиновой минерализации; 7 – рудные тела; 8 – геологические границы; 9 – надвиги предполагаемые; 10 – сбросо-сдвиги; 11 – направления блоковых сдвигов; 12 – предполагаемые взбросы; 13 – аномалии ускорения силы тяжести Δg ; 14 – ореол максимального накопления Th и K; 15 – поисковые линии, разведочные скважины и их номера (Колмаков, Сазонов, 2022)

На месторождении выделяют три этапа гидротермально-метасоматических изменений минерализованной зоны (дорудный, рудный и заключительный), происходивших уже в постколлизийную эпоху. Дорудный метасоматизм проявился в дислокационных зонах интенсивного расщепления и привел к образованию кварц-мусковитовых и хлоритовых метасоматитов с характерными для них углеродной минерализацией и акцессорным турмалином. В северо-восточной части месторождения имеется дайка гранит-порфиров, предположительно, ковригинского комплекса (рис. 1), также сопровождаемая ореолом турмалина. Гидротермально-метасоматическая минерализация рудного этапа представлена кварц-мусковит-сидеритовым парагенезисом, проявленным преимущественно в рассеянной форме и кварц-карбонатных прожилках, редко в виде собственно метасоматитов кварц-мусковит-сидеритового состава, образующих зоны до первых десятков метров. На заключительном этапе минерализованная зона была разбита субмеридиональными взбросами на серию блоков с различными амплитудами вертикального поднятия и уровнем эрозионного среза, нарастающим в северо-западном направлении (рис. 1, 3). Гидротермально-метасоматические изменения были проявлены очень слабо в виде тонких кварц-карбонатных прожилков с флюоритом.

Рудная минерализация сопровождала все гидротермально-метасоматические этапы в составе трех сульфидных парагенезисов: пирит-пирротинового на дорудном этапе, арсенопирит-пирит-пирротинового на рудном этапе и галенит-сфалеритового на заключительном. Ареал распространения пирит-пирротин-арсенопиритового парагенезиса занимает центральное положение минерализованной зоны, в продуктивной части месторождения границы его и рудных тел практически совпадают. В краях минерализованной зоны развит пирит-пирротиновый парагенезис с постепенным уменьшением доли пирротина до исключительно пиритовой минерализации на периферии. Полиметаллическая минерализация заключительно-

го этапа распространена очень локально на фоне зонального распределения сульфидов ранних парагенезисов.

Магнитные аномалии: структура, природа и связь с золотой минерализацией

В связи с наличием пирротина – единственного ферромагнетика в составе руд минерализованной зоны – ее породы обладают повышенной магнитной восприимчивостью (χ) и создают аномалии ΔT . Считается, что магнитная восприимчивость пород исследуемой площади пропорциональна концентрации пирротина в них (Колмаков, Сазонов и др., 2010).

Амплитуды магнитных аномалий рудной зоны последовательно снижаются от 500 до 80 нТл на фоне немагнитных вмещающих пород. Участок с наиболее высокоамплитудной аномалией ее северо-западного фланга непосредственно граничит с безаномальным участком (рис. 2). Магнитная неоднородность прослеживается и на глубинных горизонтах месторождения (рис. 3). В направлении падения рудных тел наблюдается увеличение магнитной восприимчивости (χ) пород. Золотая минерализация сконцентрирована в рудах с аномальной χ , но не в самых магнитных.

В ходе геолого-геофизических исследований на месторождении был детально изучен химический состав пирита и пирротина в пирит-пирротиновом и арсенопирит-пирит-пирротиновом парагенезисах, а также магнитные свойства последних (Колмаков, Сазонов и др., 2010; Колмаков, Сазонов и др., 2024).

Среди пирротинов встречены моноклинные и гексагональные модификации (с широким диапазоном соотношения Fe/S в тех и других), образование которых происходит в различных физико-химических условиях. Моноклинные пирротины относятся к классу ферримангнетиков и обладают магнитными свойствами, меняющимися в зависимости от их состава, гексагональные пирротины – антиферромагнетики, поэтому они немагнитны (рис. 4).

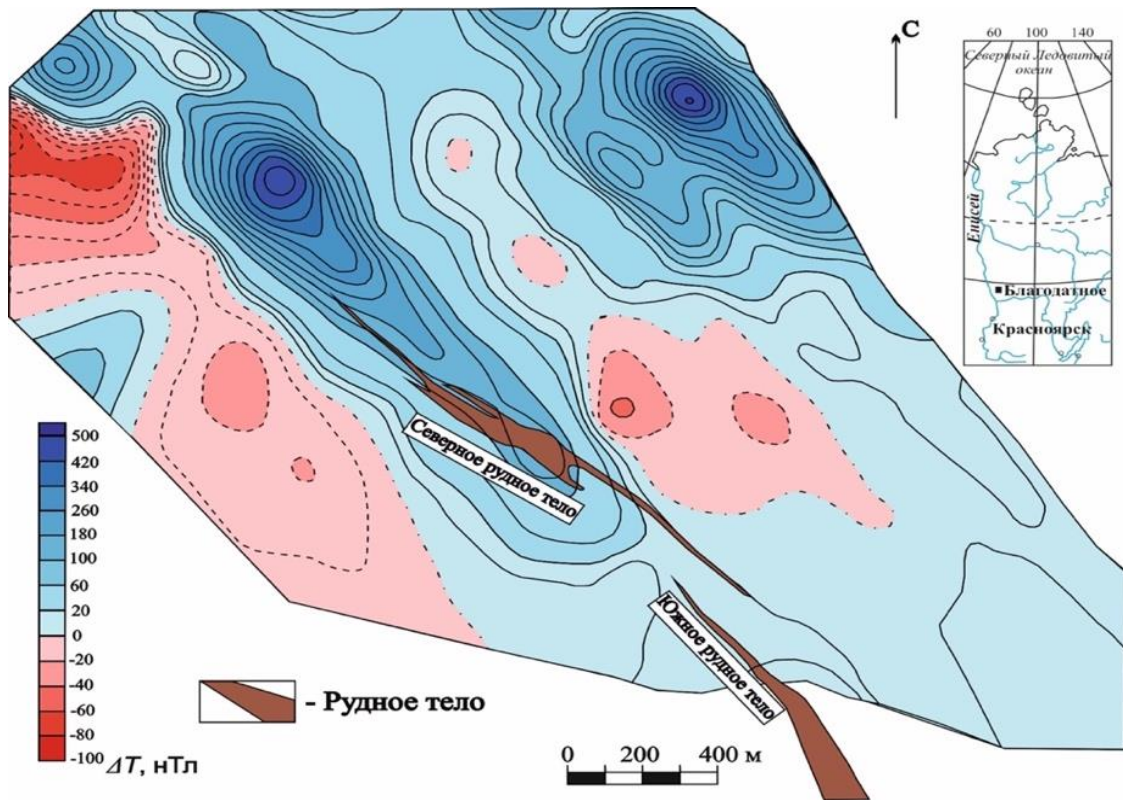


Рис. 2. Карта магнитного поля ΔT месторождения Благодатное (Колмаков, Сазонов, 2022)

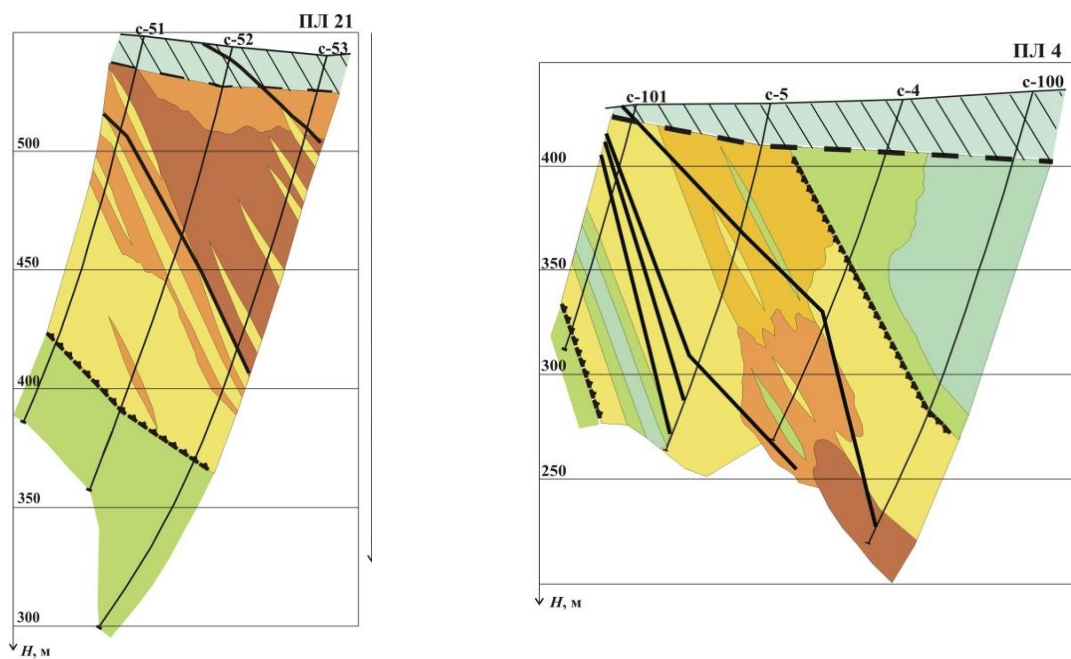


Рис. 3. Петромагнитные разрезы рудных тел (Колмаков, Сазонов, 2022)

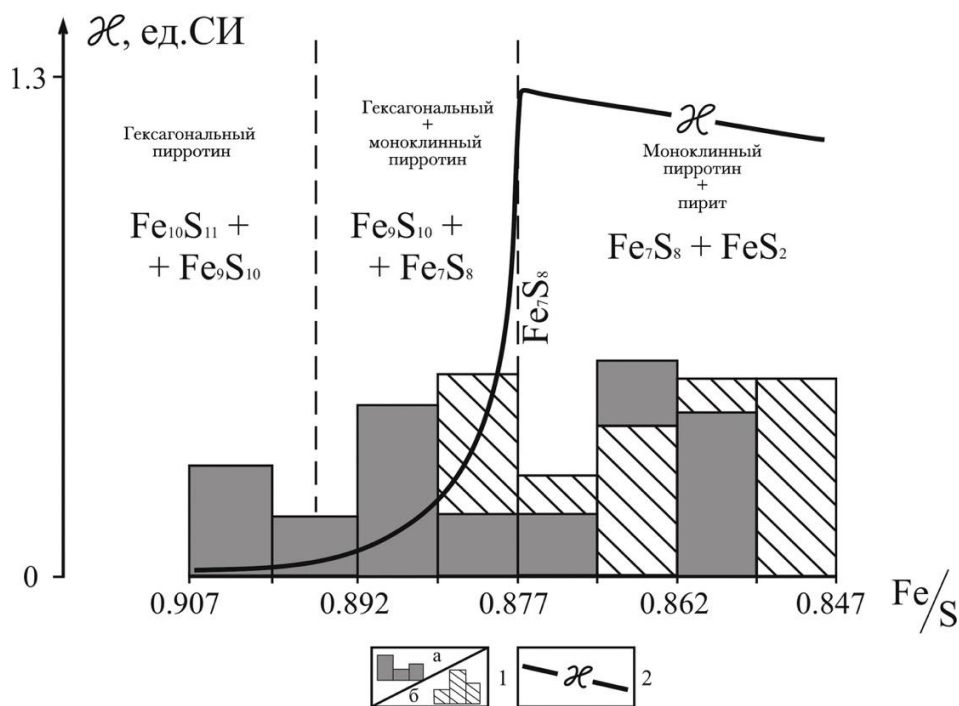


Рис. 4. Химический состав пирротинов рудных тел месторождения Благодатное, фазовые отношения в системе Fe-S и магнитная восприимчивость природных пирротинов (1 – пирротины северного (а) и южного (б) рудных тел; 2 – схематический график магнитной восприимчивости пирротинов) (Колмаков, Сазонов и др., 2024)

Ферримагнетизм моноклинных пирротин объясняется наличием и упорядоченным распределением вакансий ионов железа в структуре минерала. Упорядоченность заключается в попеременном распределении слоев железа с вакансиями (слой В) и без них (слой А) (рис. 5).

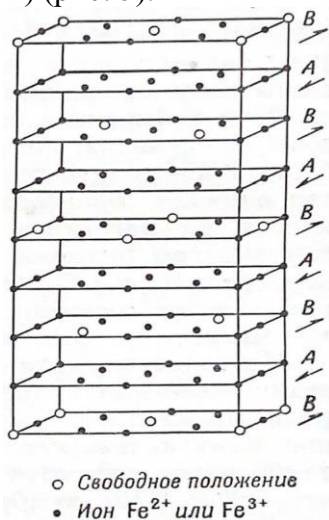
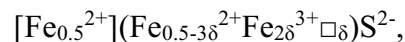


Рис. 5. Положение вакансий в структуре пирротина (по Бертаут)

Антиферромагнитное взаимодействие между слоями становится не полностью

скомпенсированным, что приводит к появлению ферримагнетизма. Теоретическое насыщение упорядоченными вакансиями с учетом баланса зарядов выражается формулой:



где $[\]$ и $()$ – подрешетки А и В соответственно, \square – вакансии (Нагата, 1965).

Теоретическая величина насыщения δ (0,125) хорошо согласуется с величиной δ (1/7, или 0,142) природного «чистого» моноклинного пирротина со стехиометрической формулой Fe_7S_8 . При $\delta > 1/7$ начинается образование пирита. Крайняя правая область в составах пирротинов (рис. 4) рассматривается как твердый раствор «чистого» моноклинного пирротина и пирита, уменьшение χ которого происходит с увеличением доли пиритового минерала. Переходная область рассматривается как раствор гексагонального и моноклинного пирротин.

Подавляющее большинство гексагональных пирротин было отобрано в северном рудном теле на самых глубоких его горизонтах. В южном рудном теле встречены главным образом моноклинные пирротины и пирротины переходной зоны, мак-

симально приближенные к моноклинным (рис. 2, 3).

Выявлена отчетливая взаимосвязь между количеством пирротина в рудных парагенезисах, их магнитной восприимчивостью и стехиометрическим отношением S/Fe в ассоциирующих пиритах (рис. 6). В северном, более магнитном, рудном теле средняя величина S/Fe пиритов (1,842) значительно ниже средней величины этого же отношения (1,998) для менее магнитного южного рудного тела. Закономерное нарастание χ руд и околорудных пород, а также снижение стехиометрического отношения S/Fe в пирите наблюдаются и по падению рудных тел во всей рудоносной зоне.

Температура в системе Fe-S-O-H₂O является важнейшим фактором равновесия фаз в пирит-пирротининовом парагенезисе. Вариации составов пирита и пирротина можно рассматривать в качестве косвенных показателей температуры гидротермальных растворов. Увеличение отношения S/Fe в пирите напрямую коррелирует с его количеством в пирит-пирротининовом парагенезисе, что обусловлено нарастанием фугитивности серы на фоне снижения температуры. Напротив, увеличение температуры и, как следствие, подавление активности сульфидной серы более благоприятно для кристаллизации пирротина. Наряду со смещением равновесия в сторону пирротина, в самом его

составе сокращается доля пиритового минерала, и он приближается к стехиометрически «чистому» моноклинному пирротину Fe₇S₈ – своей максимально магнитной фазе. Гексагональные пирротины являются более высокотемпературной модификацией, чем моноклинные.

Снижение стехиометрического отношения пиритов по падению рудных тел, доминирование пирротина в сульфидном парагенезисе и увеличение магнитной восприимчивости позволяют предполагать более высокую температуру минералообразующей системы на ее нижних горизонтах. Рост χ и амплитуды аномалии ΔT в северо-западной части рудоносной зоны трактуется углублением уровня ее эрозионного среза. Там, где достигалась максимальная температура, кристаллизовался немагнитный гексагональный пирротин, что объясняет тесную связь самого магнитного участка с немагнитным (рис. 2).

Миграция золота в гидротермальных растворах с сульфидной серой осуществляется в комплексах AuHS⁰ и Au(HS)₂⁻ (Пальянова, Колонин, 2007). Накопление Au в средне- и слабомагнитных рудах вызвано наращиванием активности сульфидной серы при снижении температуры, ее массовом связывании в пирите и арсенопирите, а также дестабилизацией AuHS⁰ и Au(HS)₂⁻.

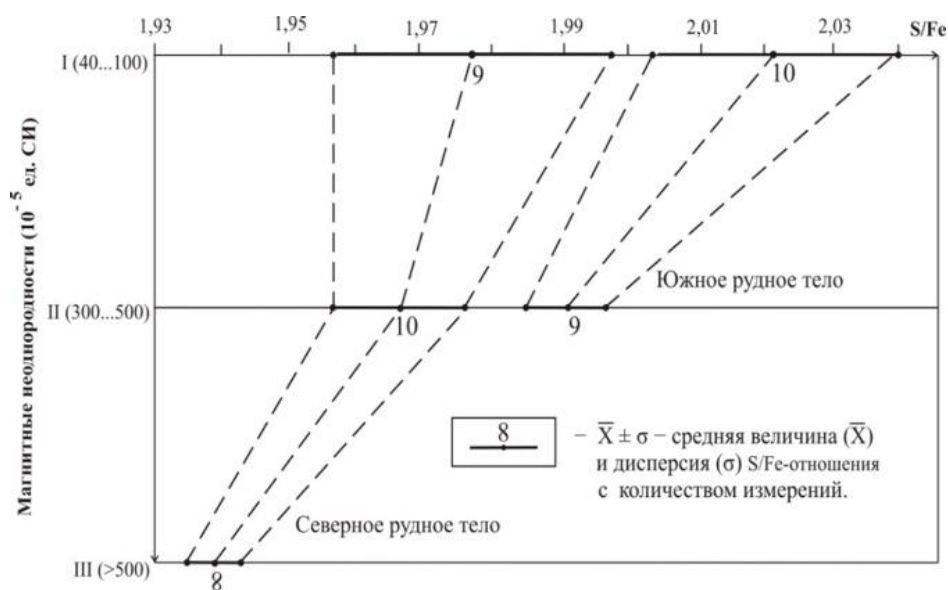


Рис. 6. Стехиометрия пиритов в магнитных неоднородностях сульфидных парагенезисов (Колмаков, Сазонов и др., 2010)

Выводы

Магнитная неоднородность месторождения Благодатное обусловлена распределением и составом пирротинов в золотосульфидных парагенезисах минерализованной зоны. Наиболее магнитными являются корневые участки рудных тел с максимально широким распределением стехиометрически «чистого» моноклинного пирротина Fe_7S_8 , сменяемого в подрудной зоне немагнитной гексагональной модификацией. Основные запасы золота сконцентрированы в средне- и слабомагнитных рудах.

Библиографический список

- Колмаков Ю.В., Сазонов А.М. Реконструкция петрофизической зональности золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском кряже: геодинамический и физико-химический аспекты: Литосфера, 2022. Т. 22, № 5 С. 667–693. DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-5-667-693 EDN: PZZDIJ
- Колмаков Ю.В., Сазонов А.М., Лазарев А.Ф., Колмаков А.Ю., Федоров В.Г. Геолого-генетическая интерпретация неоднородности золотосульфидного месторождения Благодатное (Енисейский кряж) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2024. № 1. С. 82–94. DOI: 10.20403/2078-0575-2024-1-82-94 EDN: RYTJGL
- Колмаков Ю.В., Лазарев А.Ф., Федоров В.Г. Пирротиновая минерализация золоторудных месторождений Енисейского кряжа: состав, свойства и проявление в магнитном поле // Годичное собрание РМО «Минералого-геохимические исследования для решения проблем петро- и рудогенеза, выявления новых видов минерального сырья и их рационального использования. Федоровская сессия 2023», Санкт-Петербург, 10–12 октября: сборник научных материалов. СПб: РАН, 2023 С. 124–125.
- Колмаков Ю.В., Сазонов А.М., Врублевский В.В., Потехина Е.В., Боярко Г.Ю. Вариации фугитивности серы в рудообразующем растворе: фактор магнитной зональности золотосульфидных месторождений // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 1. С. 87–90. EDN: MVMACR
- Ножкин А.Д., Брисенко А.С., Неволько П.А. Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 1. С. 158–181. EDN: NCLOPT
- Нагата Т. Магнетизм горных пород М.: Мир, 1965. 347 с.
- Пальянова Г.А., Колонин Г.Р. Геохимическая подвижность Au и Ag в условиях гидротермального переноса и отложения (термодинамическое моделирование). Серия Геохимия. 2007. № 8. С. 814–828. EDN: IAQMKN
- Федоров В.Г. Проявление в магнитном поле золоторудных месторождений медно-порфирового и золото-сульфидно-кварцевого типов // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче: сборник тезисов докладов Рудной школы. М.: ЦНИГРИ, 2024. С. 165–168.

Magnetic Heterogeneity of the Mineralized Zone of the Blagodatnoye Deposit (Yenisey Ridge)

V.G. Fedorov, Y.V. Kolmakov

National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation. E-mail: vgf2@tpu.ru

The history of the geodynamic development of the Yenisei Ridge from the perspective of the supercontinental cycles is briefly illuminated. The geological structure of the Blagodatnoye gold-sulfide deposit, and the stages of its hydrothermal-metasomatic evolution are described. The magnetic structure of the mineralized zone is characterized in detail. The relationship of pyrite and pyrrhotite compositions with the magnetic heterogeneity of pyrite-pyrrhotite paragenesis and the distribution of gold mineralization in the ore zone has been established.

Key words: Yenisey Ridge; Blagodatnoye deposit; magnetic exploration; pyrite-pyrrhotite paragenesis.

References

- Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M.* 2022. Rekonstruktsiya petrofizicheskoy zonalnosti zolotorudnogo mestorozhdeniya Blagodatnoe v Eniseyskom kryazhe: geograficheskiy i fiziko-khimicheskiy aspecty [Reconstruction of the petrophysical zonality of the Blagodatnoye gold deposit in the Yenisei Ridge: geodynamic and physical-chemical aspects]. *Lithosphere*. 22(5):667-693. (in Russian)
- Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M., Lazarev A.F., Kolmakov A.Yu., Fedorov V.G.* 2024. Geologogineticeskaya interpretatsiya neodnorodnosti zoloto-sulfidnogo mestorozhdeniya Blagodatnoe (Eniseyskiy kryazh) [Geological and genetic interpretation of the heterogeneity of the Blagodatnoye gold-sulfide deposit (Yenisey Ridge)]. *Geologiya i mineralnye resursy Sibiri*. 1:82-94. (in Russian)
- Kolmakov Yu.V., Lazarev A.F., Fedorov V.G.* 2023. Pirrotinovaya mineralizatsiya zolotorudnykh mestorozhdeniy Eniseyskogo kryazha: sostav, svoystva i proyavlenie v magnetnom pole [Pyrrhotite mineralization of gold deposits of the Yenisei Ridge: composition, properties, and manifestation in a magnetic field]. *In: Annual meeting of the RMO Mineralogical and geochemical research to solve the problems of petro- and ore genesis, identification the new types of mineral raw materials, and their rational use. Fedorov Session 2023*. St. Petersburg, October 10-12. St. Petersburg, RAS, pp. 124-125. (in Russian)
- Kolmakov Yu.V., Sazonov A.M., Vrublevsky V.V., Potekhina E.V., Boyarko G.Yu.* 2010. Variatsii fugitivnosti sery v rudoobrazuyushchem rastvore: factor magnitnoy zonalnosti zolotosulfidnykh mestorozhdeniy [Variations of sulfur fugacity in ore-forming solution: factor of magnetic zonation of gold sulfide deposits]. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 1(317):87-90. (in Russian)
- Nozhkin A.D., Brisenko A.S., Nevolko P.A.* 2011. Etapy pozdneproterozyoskogo magmatizma i vozrastnye rubezhi zolotogo orudneniya Eniseyskogo kryazha [Stages of Late Proterozoic magmatism and age limits of the golden mineralization of the Yenisey Ridge]. *Geology and geophysics*. 52(1):158-181. (in Russian)
- Nagata T.* 1965. *Rock Magnetism*. Tokyo, Maruzen Co., Ltd., p. 350.
- Palyanova G.A., Kolonin G.R.* 2007. Geokhimicheskaya podvizhnost Au and Ag v usloviyakh gidrotermalnogo perenosa i otlozheniya (termodinamicheskoe modelirovanie) [Geochemical mobility of Au and Ag under conditions of hydrothermal transport and deposition (thermodynamic modeling)]. *Geochemistry*. 8:814-828. (in Russian)
- Fedorov V.G.* 2024. Proyavlenie v magnetnom pole zolotorudnykh mestorozhdeniy mednoporfirovogo i zoloto-sulfidno-kvartsevogo tipov [Manifestation of gold ore deposits of copper-porphyry and gold-sulfide-quartz types in the magnetic field]. *In: Mineral resource base of diamonds, precious and non-ferrous metals – from forecast to production: collection of abstracts of the Ore School 2024*, Moscow, February 14-16, 2024. Moskva, TSNIGRI, pp. 165-168. (in Russian)