

УДК 553.411.071

# Магнитная неоднородность минерализованной зоны месторождения Благодатное (Енисейский кряж)

**В.Г. Федоров, Ю.В. Колмаков**Национальный 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 кряжа 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 кряж, месторождение Благодатное, магниторазведка, пирит-пирротинный парагенезис.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.1.62

## Геодинамическая обстановка Енисейского кряжа

Большинством исследователей Енисейский кряж рассматривается в качестве аккреционно-коллизийной структуры юго-западного складчатого обрамления Сибирского кратона. Месторождение Благодатное находится в осевой части Центрального блока заангарской части Енисейского кряжа. 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 кряжа породы перечисленных свит являются рудовмещающими.

3. В раннем неопротерозое литосферное развитие Енисейского кряжа происходило в коллизийной обстановке. Сам кряж 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



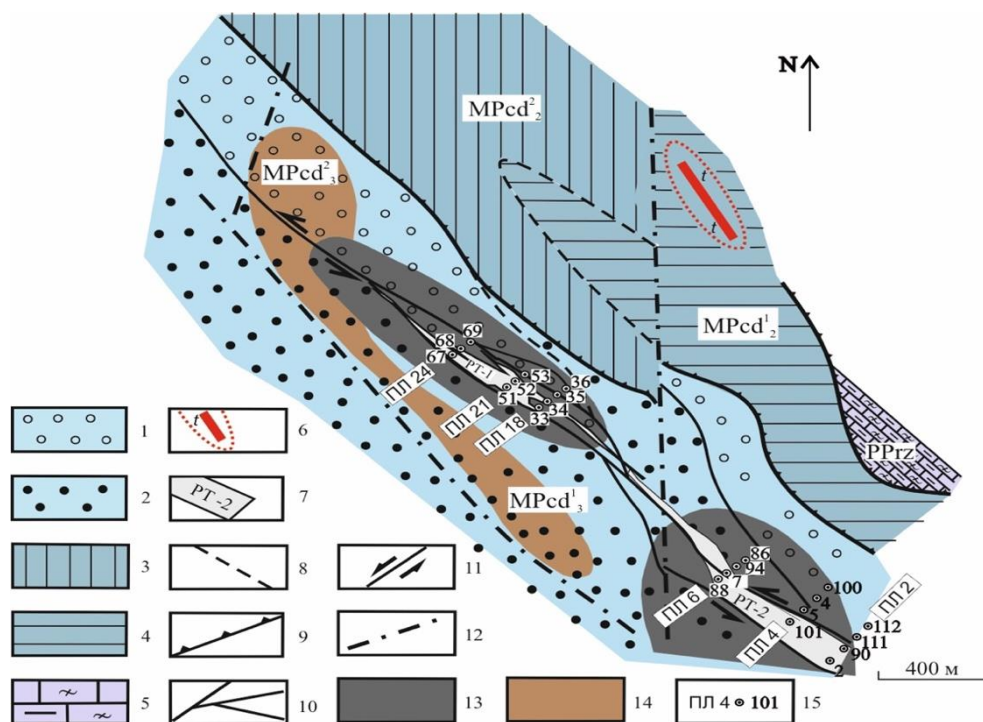
Эта работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

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 синколлизонных надвигов, сформированной на рубеже раннего и позднего неопротерозоя. Рудную минерализацию вмещает сбрососдвиговое нарушение, заложенное в позднем неопротерозое среди зон локального дислокационного метаморфизма синколлизонной 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  $\Delta g$ ; 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 ( $\chi$ ) и создают аномалии  $\Delta T$ . 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 ( $\chi$ ) пород. Золотая минерализация сконцентрирована в рудах с аномальной  $\chi$ , 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).

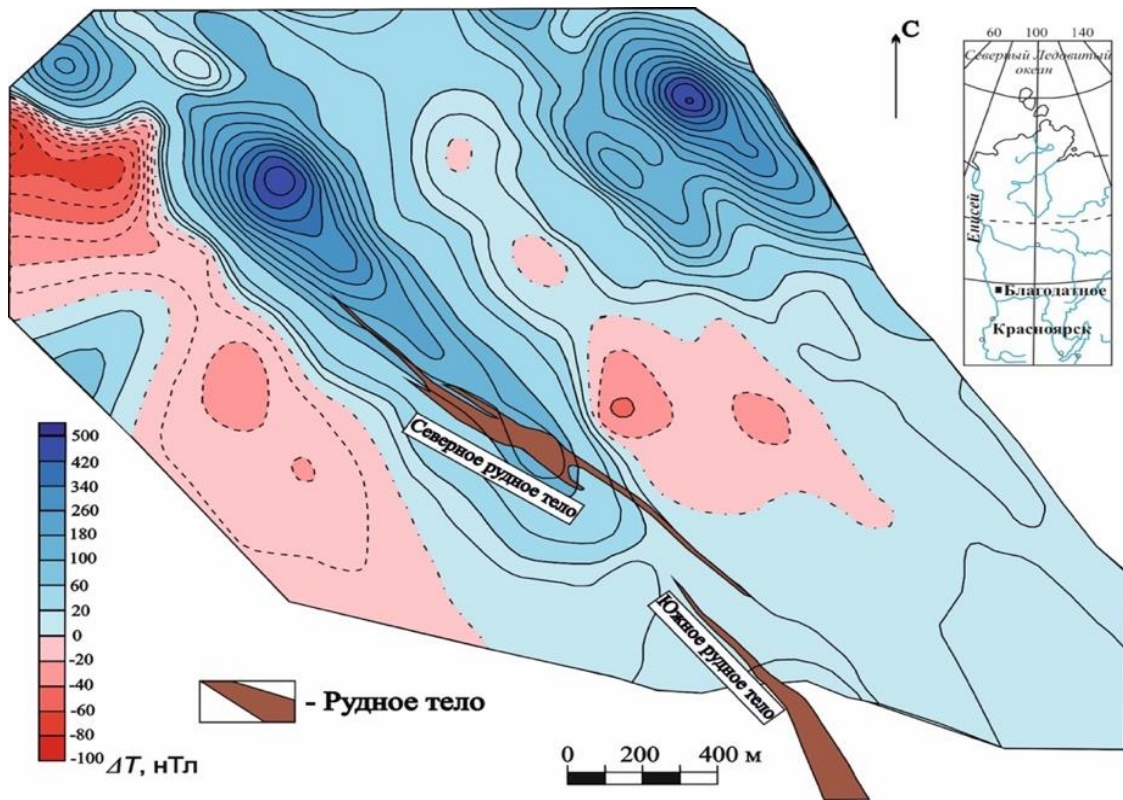


Рис. 2. Карта магнитного поля  $\Delta T$  месторождения Благодатное (Колмаков, Сазонов, 2022)

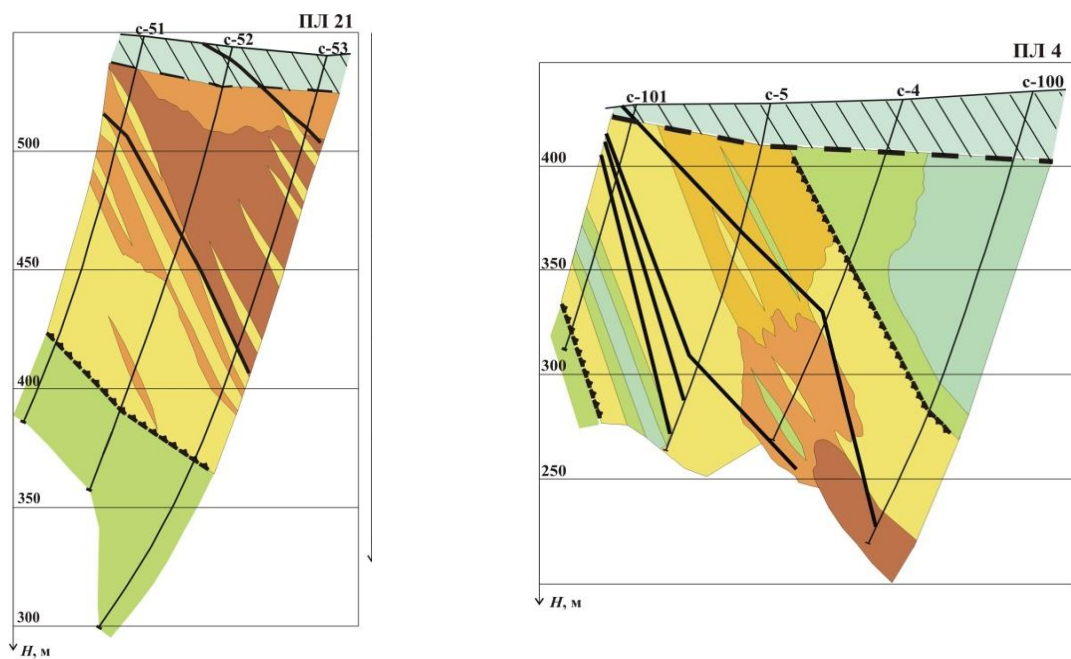
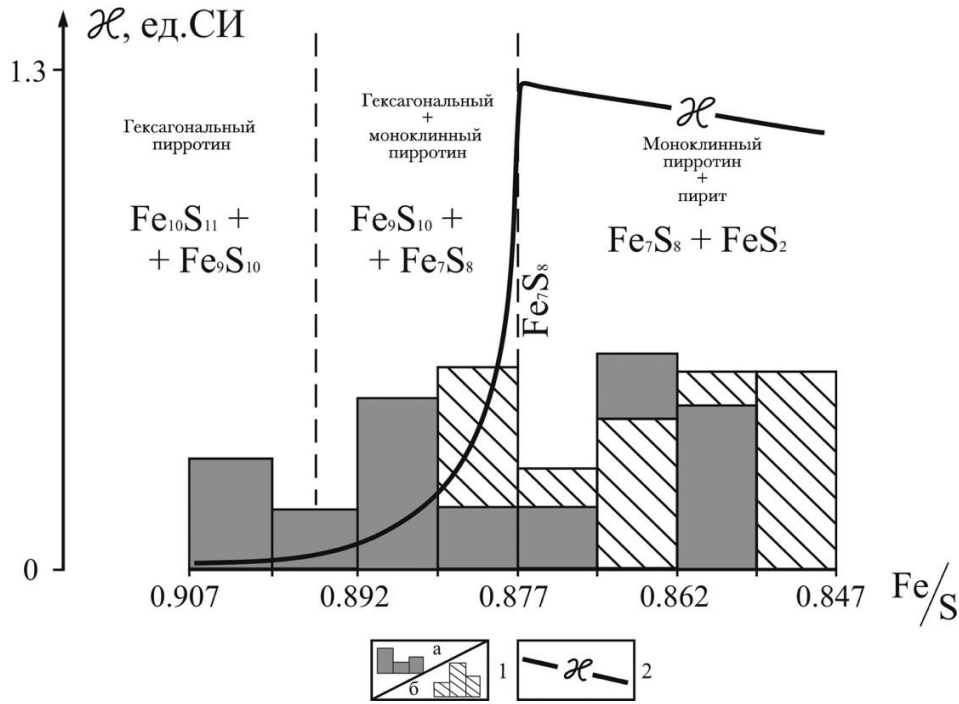


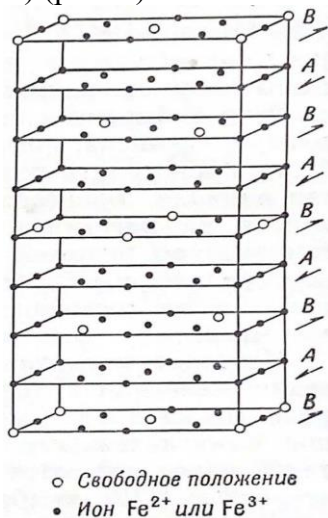
Рис. 3. Петромагнитные разрезы рудных тел (Колмаков, Сазонов, 2022)





**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)

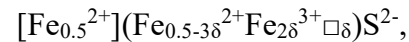
Ферримагнетизм моноклинных пирротин объясняется наличием и упорядоченным распределением вакансий ионов железа в структуре минерала. Упорядоченность заключается в попеременном распределении слоев железа с вакансиями (слой В) и без них (слой А) (рис. 5).



**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  $\delta$  (0,125) хорошо согласуется с величиной  $\delta$  (1/7, или 0,142) природного «чистого» моноклинного пирротина со стехиометрической формулой Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>. 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  $\chi$  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  $\chi$  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-H<sub>2</sub>O 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 Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub> – 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  $\chi$  и амплитуды аномалии  $\Delta T$  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 AuHS<sup>0</sup> и Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup> (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 AuHS<sup>0</sup> и Au(HS)<sub>2</sub><sup>-</sup>.

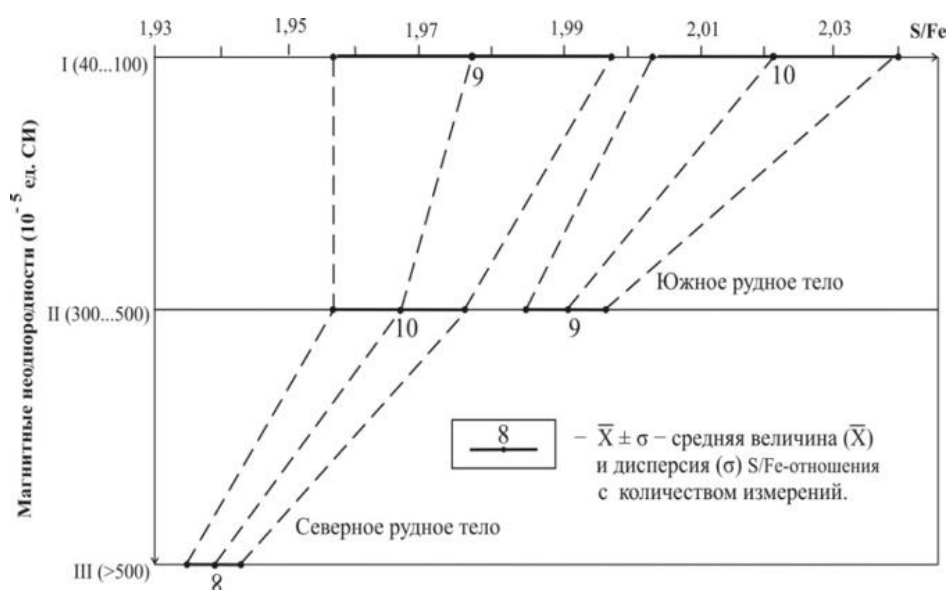


Рис. 6. Стехиометрия пиритов в магнитных неоднородностях сульфидных парагенезисов (Колмаков, Сазонов и др., 2010)

## 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 Yenisey 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 pozdneproterozoyskogo 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)