



УДК 553.064.32 (553.311.2)

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-3>

ВИСМУТОВЫЕ МИНЕРАЛЫ НАЗАРОВСКОГО ЗОЛОТО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Ю.А. Рыжкова, К.А. Новоселов, М.А. Рассомахин, Е.А. Рожкова

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и экологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; padushina@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 28.01.2025 г., после доработки 07.02.2025 г., принята к печати 11.02.2025 г.

Аннотация. Изучена висмутовая минерализация кварц-сульфидных прожилков Назаровского золото-полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье), локализованного в пределах Еравнинской вулкано-тектонической структуры и приуроченного к зоне Назаровского разлома и экзоконтакту массива гранодиоритов, которые прорывают вулканогенно-осадочные породы. Минералы Bi представлены сульфосолями состава Ag-Bi, Cu-Bi, Pb-Bi и Ag-Pb-Bi, сульфотеллуридами Bi, айкинитом и самородным висмутом в ассоциации с халькопиритом и галенитом. Значительная часть минералов Bi впервые описана не только для Назаровского месторождения, но всего Озернинского рудного узла.

Ключевые слова: висмутовые минералы, Назаровское месторождение, Западное Забайкалье, Республика Бурятия, самородный висмут, Ag-Bi, Cu-Bi, Pb-Bi и Ag-Pb-Bi сульфосоли, сульфотеллуриды Bi.

Финансирование. Работы выполнены в рамках государственной бюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы благодарны П.В. Мейдич за предоставленный материал, Е.В. Белогуб и У.А. Ятимову за обсуждение статьи и полезные замечания.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Ю.А. Рыжкова – исследование, написание черновика рукописи, визуализация. К.А. Новоселов – написание и редактирование рукописи, М.А. Рассомахин. – аналитические работы, Е.А. Рожкова – исследование породообразующих минералов. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Рыжкова Ю.А., Новоселов К.А., Рассомахин М.А., Рожкова Е.А. Висмутовые минералы Назаровского золото-полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье). Минералогия, 2025, 11(1), 28–42. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-3.

BISMUTH MINERALS OF THE NAZAROVSKOE GOLD POLYMETALLIC DEPOSIT (WESTERN TRANSBAIKALIA)

Yu.A. Ryzhkova, K.A. Novoselov, M.A. Rassomakhin, E.A. Rozhkova

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district,
456317 Russia; padushina@mail.ru*

Received 28.01.2025, revised 07.02.2025, accepted 11.02.2025

Abstract. The Bi mineralization is described in quartz-sulfide veins of the Nazarovskoe gold polymetallic deposit (Western Transbaikalia), which is localized within the Eravnino volcano-tectonic structure and is confined to the Nazarovskoe fault zone and the contact with a granodiorite pluton intruding volcanosedimentary rocks. The Bi minerals include Ag-Bi, Cu-Bi, Pb-Bi, and Ag-Pb-Bi sulfosalts, Bi sulfotellurides, aikinite, and native bismuth in assemblage with chalcopyrite and galena. Most Bi minerals are described for the first time both for the Nazarovskoe deposit and the entire Ozerninsky ore cluster.

Keywords: Bi minerals, Nazarovskoe deposit, Western Transbaikalia, Republic of Buryatia, native bismuth, Ag-Bi, Cu-Bi, Pb-Bi, and Ag-Pb-Bi sulfosalts, Bi sulfotellurides.

Funding. This work was supported by state contract of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS № 122031600292-6.

Acknowledgements. We are grateful to P.V. Meidich for material and E.V. Belogub and U.A. Yatimov for constructive and useful comments, which allowed us to improve the manuscript.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interest related to the manuscript.

Author contribution. Yu.A. Ryzhkova – research, writing a draft of the manuscript, visualization. K.A. Novoselov – writing and editing the manuscript, M.A. Rassomakhin. – analytical work, E.A. Rozhkova – research of rock-forming minerals. All authors approved the final version of the article before publication.

For citation: Ryzhkova Yu.A., Novoselov K.A., Rassomakhin M.A., Rozhkova E.A. Bismuth minerals of the Nazarovskoe gold polymetallic deposit (Western Transbaikalia). *Mineralogy*, 11(1), 28–42. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-3

ВВЕДЕНИЕ

Висмут является элементом, минералогия которого, наряду с теллурием, отличается исключительным разнообразием (Christy, 2015). В природе он присутствует в самородной форме, а также в виде сульфосолей, сульфидов, теллуридов, оксидов и гидроксидов. Изоморфная примесь висмута присутствует в некоторых сульфидах, прежде всего, в галените. Также разнообразны геологические обстановки, в которых присутствуют висмутовые минералы. Повышенные концентрации висмута известны в пегматитах, контактово-метасоматических, гидротермальных месторождениях, связанных с интрузивами кислого состава (Вольфсон, Дружинин, 1975). Собственных месторождений висмут, как правило, не образует и добывается как попутный компонент из свинцовых, медных, медно-золотых, олово-вольфрамовых руд и др.

Минералы висмута часто рассматриваются как важный петрогенетический индикатор (Cook, Ciobanu, 2004; Voudouris et al., 2007; Ciobanu et al., 2010; Zhou et al., 2016; Fitros et al., 2017; Ятимов и др., 2019; Касаткин и др., 2023). Специфические особенности металлического висмута, а именно его легкоплавкость, легли в основу LBC-модели (*liquid bismuth collector model*) образования золотых руд (Douglas et al., 2000; Ciobanu et al., 2006; Tooth, 2013).

В настоящей работе рассмотрена минералогия висмута в рудах Назаровского золото-полиметаллического месторождения, принадлежащего к Озернинскому рудному узлу в Западном Забайкалье, который вмещает множество месторождений и рудопроявлений цветных и благородных металлов, железа, марганца, бора, апатита, барита. Наиболее значимым объектом в нем является крупное Озерное колчеданно-полиметаллическое месторождение, балансовые запасы которого по категории В

+ C₁ + C₂ на 01.01.2015 составляли 135 млн т руды при среднем содержании Zn 6.16 %, Pb 1.17 % и Ag 35 г/т (сайт <https://nedradv.ru/nedradv/invetosp?obj=9ca8e2d2ab6e71575d82c482dcff2688> дата обращения 06.06.2024)).

Назаровское месторождение расположено в 4 км от Озерного. Оно отличается от последнего геологической позицией, составом руд, а также существенно меньшим масштабом оруденения. Его запасы на 31.05.1982 г. составляли 5.9 млн т руды по категориям C₁ и C₂ при средних содержаниях 7.84 % Zn и 0.8 г/т Au. Также в рудах присутствуют Cu, Ag, Cd, Bi (сайт <https://nedradv.ru/nedradv/invetosp?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4013ce0> (дата обращения 06.06.2024)). Запасы висмута составляют 689 тыс. т при среднем содержании 0.016 % (Дорошкевич, 2002ф).

Назаровское месторождение изначально было известно как железорудное проявление участка Гематитового, и было доизучено в 1967 г. в ходе геолого-геофизических работ. В разные годы месторождение изучалось В.Г. Беличенко, Л.П. Хряниной, Е.И. Ткаченко, В.А. Варламовым, С.В. Горбуновым, Р.С. Тарасовой, Д.И. Царевым, Э.Г. Дистановым, Г.Г. Русиным, А.И. Бусленко, И.В. Гордиенко, К.Р. Ковалевым и др. В опубликованных источниках говорится о повышенных концентрациях висмута (50–100 г/т) в рудах. Здесь были диагностированы самородной висмут, висмутин, оураит, шапбахит (Ковалев и др., 2003; Рыжкова, 2020; Мунконов, Дамдинова, 2023). В данной статье минералогия висмута в сульфидных рудах на месторождении рассмотрена более подробно.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Озернинский рудный узел находится в пределах Еравнинской вулканогенно-тектонической структуры, которая является фрагментом палеозойской

Удино-Витимской островодужной системы. Основная часть рудного узла сложена стратифицированными терригенно-карбонатно-вулканогенными образованиями палеозойского возраста, прорванными многочисленными интрузивными и субвулканическими породами (Платов и др., 2013ф; Гордиенко, Нефедьев, 2015; Дамдинов и др., 2023). Преобладающее значение имеют нижнекембрийские образования олдындинской свиты, формирование которых происходило в условиях зрелой энсиалической островной дуги (Гордиенко, Нефедьев, 2015). Мощность свиты превышает 2000 м, она представлена вулканитами андезит-дацит-риолитового ряда, вулканогенно-обломочными породами и биогермными известняками (рис. 1). Островодужная стадия завершилась в среднем ордовике – силуре, когда наряду с вулканизмом происходило накопление прибрежно-морских осадков. В среднем палеозое (D-C₁) в задуговой обстановке на активной континентальной окраине были сформированы наложенные осадочные прогибы и рифтогенные вулканотектонические структуры. На заключительном этапе образования структуры в позднем палеозое-мезозое район был затронут наземным вулканизмом и внутриплитным интрузивным магматизмом (Гордиенко, Нефедьев, 2015).

Традиционно Еравнинскую структуру интерпретировали как останец – провис кровли верхнепалеозойского гранитного массива (Дистанов, 1977; Бусленко, Ковалев, 1975). Б.Б. Дамдиновым с соавторами она рассматривается как самостоятельный тектонический блок, инъецированный более молодыми гранитоидами (Дамдинов и др., 2023). Озернинский рудный узел вмещает стратиформные полиметаллические, скарновые железорудные и полиметаллические месторождения и рудопроявления, которые локализованы среди пород олдындинской свиты (Гордиенко и др., 2013; Гордиенко, Нефедьев, 2015).

Назаровское месторождение связано с тектоно-купольным поднятием субширотного простирания, обусловленным внедрением позднепалеозойских гранитов в нижнекембрийские образования (Нефедьев, 2009). Осадочно-вулканогенные отложения St₁ в нижней части разреза представлены мраморизованными известняками. Выше карбонатной пачки наблюдается переслаивание вулканогенно-обломочных пород среднего состава и известняков. В верхней части разреза залегают вулканиты среднего состава. Простирание пород северо-восточное, падение юго-восточное 60–80° (Нефедьев, 2009).

Вулканогенно-осадочные породы в восточной части прорваны нижнекембрийскими кварцевыми диоритовыми порфиритами сурхобтинского комплекса и позднепалеозойскими кварцевыми сиенитами. Сиениты слагают гребневидный купол северо-восточного простирания размером 5–6 × 1.5–2.0 км, апикальная часть которого залегает на глубине 100–200 м.

Вмещающие породы изменены в условиях зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. Также на месторождении широко проявлено скарнирование и ороговикование пород. Роговики образуют маломощный (10–40 м) ореол вдоль контактов массива. По составу выделяются биотит-кварц-полевошпатовые, реже биотит-полевошпатовые и кварц-полевошпатовые фации. Скарны проявлены в толще мраморизованных и хемогенных известняков, на контакте известняков с туфами, дайками долеритов и долеритовых порфиритов. Мощность тел варьирует от 0.7 до 37.6 м. Широко распространены скарны гранат-эпидотового, кальцит-эпидотового, кальцит-гранатового, амфибол-эпидотового состава. Гранатовые, амфиболовые, эпидотовые, тремолит-волластонитовые скарны редки (рис. 2). Содержания карбонатов и слюды в амфибол-эпидотовых скарнах варьируют в широких пределах (5–40 об. %).

Полиметаллическое оруденение приурочено к сложно построенной минерализованной зоне в экзоконтакте диоритовых порфиритов, в пределах которой развиты гидротермально измененные породы различного состава (Пятилов, Жданов, 2014ф). В разрезе наблюдается сложное чередование вулканитов и вулканогенно-обломочных пород основного состава с известняками, на которые наложены скарны (рис. 3). Ведущую роль в размещении руд играют разрывные нарушения субмеридионального простирания, определяющие морфологию и протяженность рудных тел. На месторождении выделено пять золото-сульфидно-цинковых рудных тел, в трех из которых заключены основные запасы (80–90 %). Рудные тела имеют линзо- и пластообразную форму с крутым падением (47–78°) (Базаров, Кислов, 2011). Сульфидные полиметаллические руды перемежаются с пластовыми залежами оксидно-железистых руд (Ковалев и др., 2003). Мощность сульфидных полиметаллических рудных тел варьирует от 0.56 до 26.73 м (Базаров, Кислов, 2011). В зоне окисления, развитой над золото-сульфидными рудными телами и сульфидизированными метасоматитами, запасы золота достигают 0.53 т и сере-

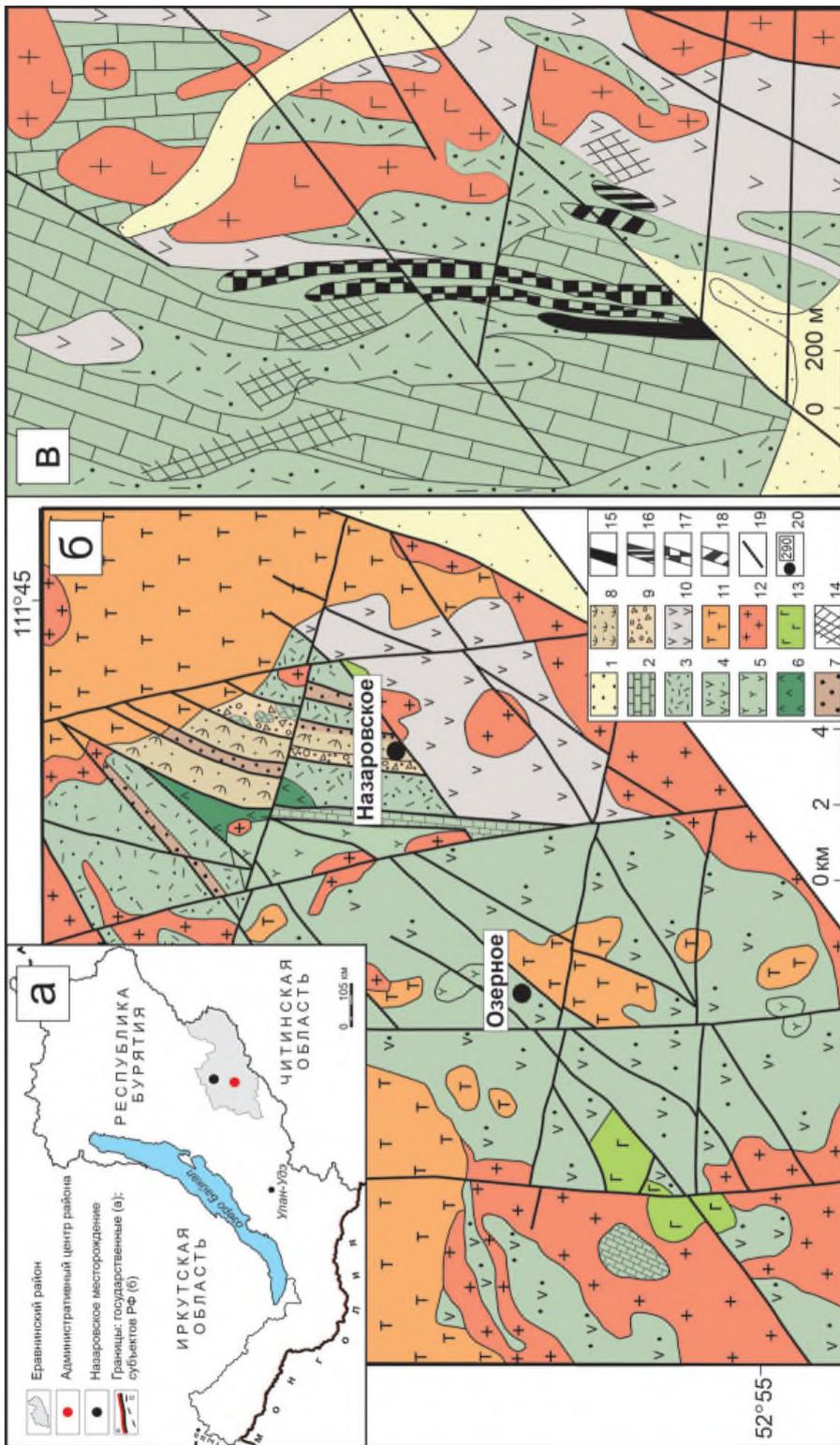


Рис. 1. Схемы географического положения Назаровского месторождения (а) и геологического строения Озернинского рудного узла, с упрощением по (Гордиенко, Нефедьев, 2015) (б), геологическая карта Назаровского месторождения, с упрощениями по (Нефедьев, 2009) (в).

1 – мезо-кайнозойские отложения впадин; 2–4 – островодужный комплекс, ольдынская свита (Є1), толщи: 2 – терригенно-карбонатная; 3 – риолитовая; 4 – андезит-дацитовая; 5 – ольдынский субвулканический комплекс (Є1); 6 – андезитовая толща (O2); 7–10 – комплекс наложенных рифтогенных структур, толщи: 7 – терригенная (S2?); 8 – туфогенно-терригенная (D1-2); 9 – карбонатно-терригенно-туфогенная (D3-C1); 10 – андезитовая (C2-3); 11–13 – магматические комплексы верхнего палеозоя: 11 – вулканогенный игнимбрит-риолитовый; 12 – гранит-граносиенитовый; 13 – габброидный; 14 – зоны скарнирования; 15–18 – рудные тела: 15 – магнетитовые; 16 – гематитовые; 17 – золото-полиметаллические; 18 – марганцевые; 19 – разрывные нарушения; 20 – месторождения.

Fig. 1. Schemes of geographical position of the Nazarovskoe deposit (a) and geological structure of the Ozerenskoye ore cluster, simplified after (Gordienko, Nefediev, 2015) (b) and geological map of the Nazarovskoe deposit, simplified after (Nefediev, 2009) (v).

1 – Meso-Cenozoic deposits of depressions; 2–4 – island-arc complex, Oldynda Formation (Є1), units: 2 – terrigenous-carbonate; 3 – rhyolite; 4 – andesite-dacite; 5 – Oldyn subvolcanic complex (Є1); 6 – andesite unit (O2); 7–10 – complex of superimposed rift-related structures, units: 7 – terrigenous (S2?); 8 – tuffogenic-terriгенous (D1-2); 9 – carbonate-terriгенous-tuffaceous (D3-C1); 10 – basaltic andesite (C2-3); 11–13 – Upper Paleozoic igneous complexes: 11 – volcanic ignimbrite-rhyolite; 12 – granite-granosienite; 13 – gabbroid; 14 – skarn zones; 15–18 – ore bodies: 15 – magnetite; 16 – hematite; 17 – gold-polymetallic; 18 – manganese; 19 – faults; 20 – deposits.

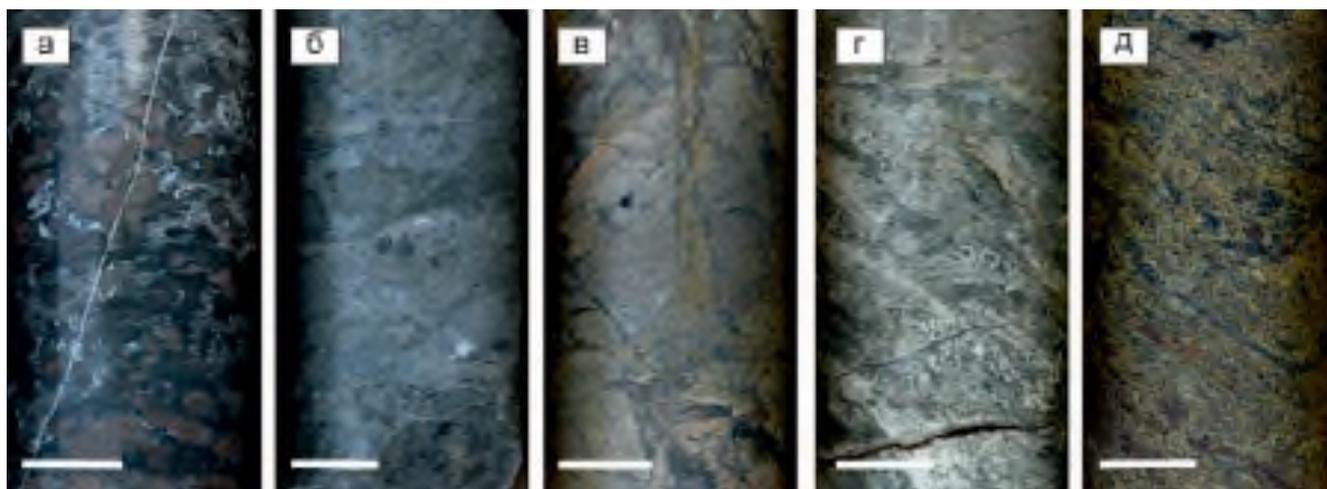


Рис. 2. Кальцит-гранатовые (а), амфиболовые (б), гранат-амфиболовые (в), тремолит-воластонитовые (г) и амфибол-эпидотовые (д) скарны северной части Назаровского месторождения.

Масштабная линейка 2 см.

Fig. 2. Calcite-garnet (a), amphibole (б), garnet-amphibole (в), tremolite-wollastonite (г), amphibole-epidote (д) skarns of the northern part of the Nazarovskoe deposit.

Scale bar is 2 cm.

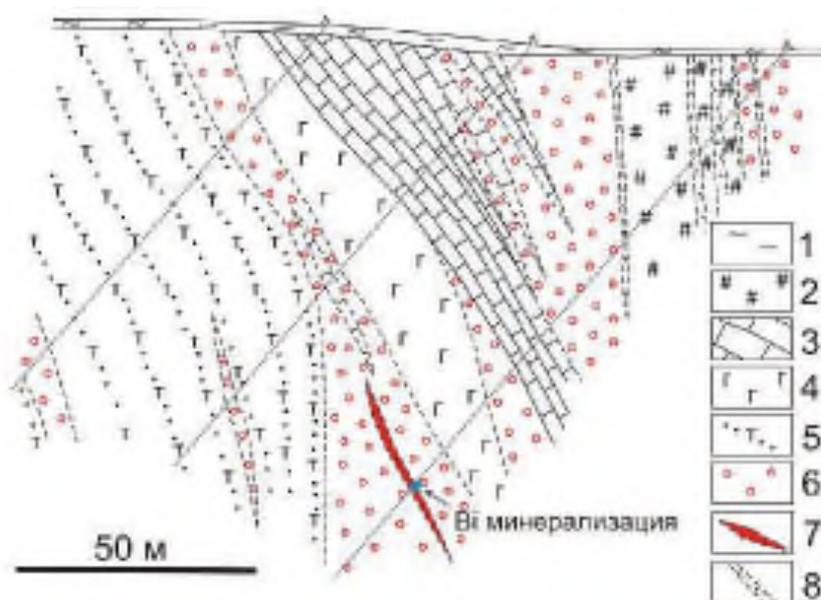


Рис. 3. Геологический разрез Назаровского месторождения, по полевым материалам.

1 – покровные отложения; 2 – гематитовые руды; 3 – известняки; 4 – лавы основного состава; 5 – вулканогенно-обломочные породы основного состава; 6 – скарны; 7 – сульфидные руды; 8 – зоны дробления.

Fig. 3. Geological cross-section of the Nazarovskoe deposit, based on field materials.

1 – Cover deposits; 2 – hematite ores; 3 – limestones; 4 – lavas of mafic composition; 5 – volcaniclastic rocks of mafic composition; 6 – skarns; 7 – sulfide ores; 8 – brecciation zones.

бра до 5.3 т (сайт <https://nedradv.ru/nedradv/invetssp?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4013ce0>; Базаров, Кислов, 2011).

Руды месторождения подразделяются на магнетитовые, гематитовые, золото-полиметаллические и марганцевые (рис. 4а, б). Сульфидная

минерализация проявлена густой вкрапленностью пирита в карбонатизированных амфибол-эпидотовых скарнах. Текстуры руд Назаровского месторождения преимущественно грубополосчатые, гнездовые, вкрапленные, гнездово-вкрапленные, прожилково-вкрапленные, массивные (рис. 4в–ж).

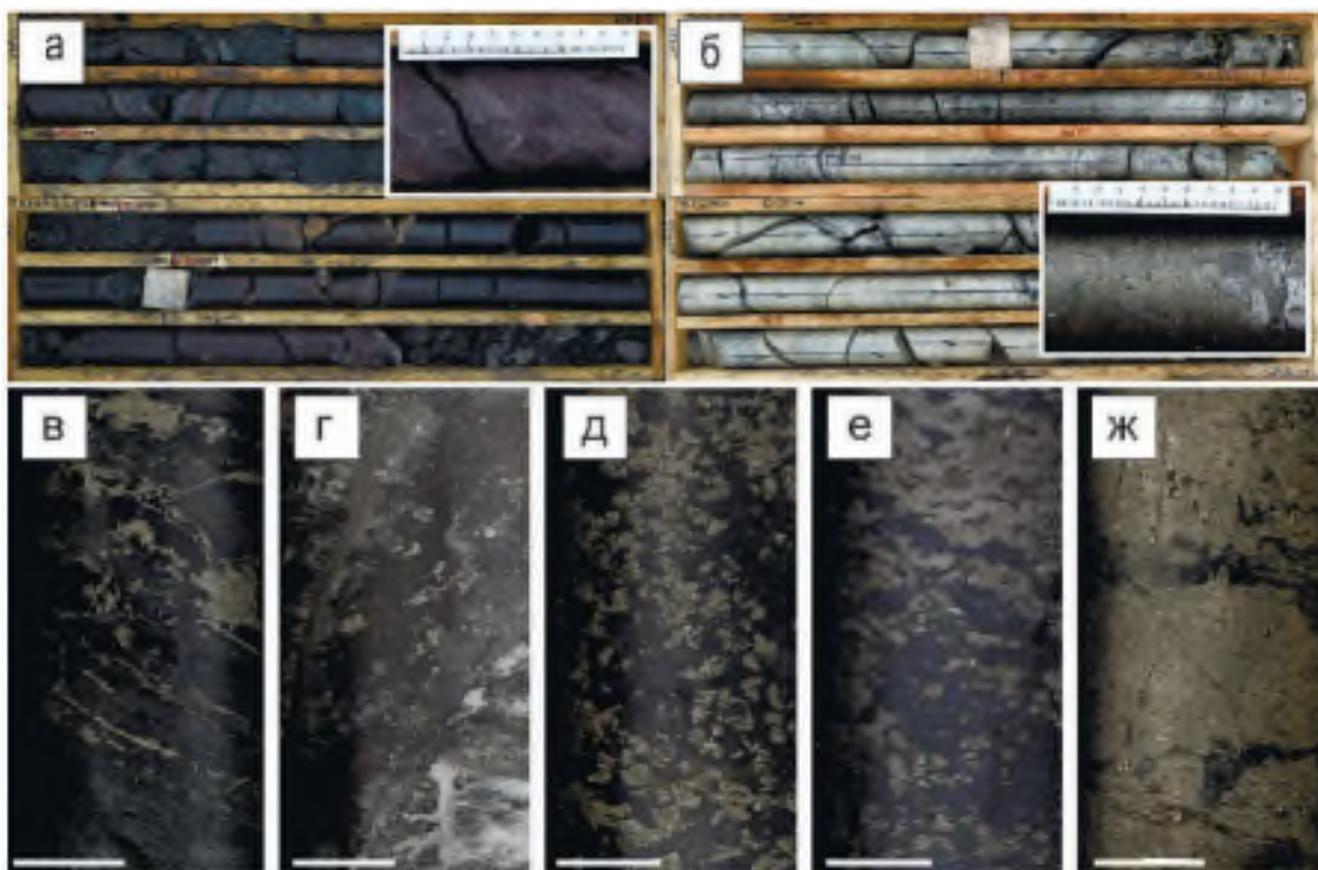


Рис. 4. Руды Назаровского месторождения: а – гематитовая; б – сульфидная; текстуры руд: в – гнездово-вкрапленная; г, д – прожилково-вкрапленная; е, ж – массивная.

Масштабная линейка на рис. в-ж – 2 см.

Fig. 4. Ores of the Nazarovskoe deposit: а – hematite; б – sulfide; ore textures: в – pocket-disseminated; г, д – stringer-disseminated; е, ж – massive.

Scale bar for Figs. в-ж is 2 cm.

Среди рудообразующих минералов преобладают пирит, сфалерит, арсенопирит. В различных соотношениях встречаются халькопирит, галенит, пирротин, марказит, густавит ($\text{AgPbBi}_3\text{S}_6$), магнетит, гематит, рутил (Бусленко, Ковалев, 1975; Дистанов, 1977; Нефедьев, 2009; Рыжкова, 2020). Самородное золото образует тонкие (до 0.001 мм, редко 0.1–0.2 мм) включения в пирите, кварце, халькопирите и сфалерите. Пробность золота варьирует от 710–740 ‰ (Нефедьев, 2009) до 820–880‰ (Ковалев и др., 2003).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения были отобраны пробы из керн на оценочных скважин северного фланга Назаровского месторождения. Исследования проведены в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс). Минеральный состав руд и вмещающих

пород изучался с помощью поляризационного микроскопа AxioScore A.1. Для определения химического состава рудных минералов использовался растворяющий электронный микроскоп Tescan Vega3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act при ускоряющем напряжении 20 кВ, времени набора 120 сек, диаметре зонда 1 мкм. Количественный анализ проведен с использованием эталонов MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited» (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералы висмута диагностированы в сфалерит-халькопирит-пирит-кварцевых прожилках мощностью 2 см, пересекающих кварц-мусковит-хлорит-карбонатный метасоматит (рис. 5а). Основными рудными минералами в прожилках являются пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, магнетит и

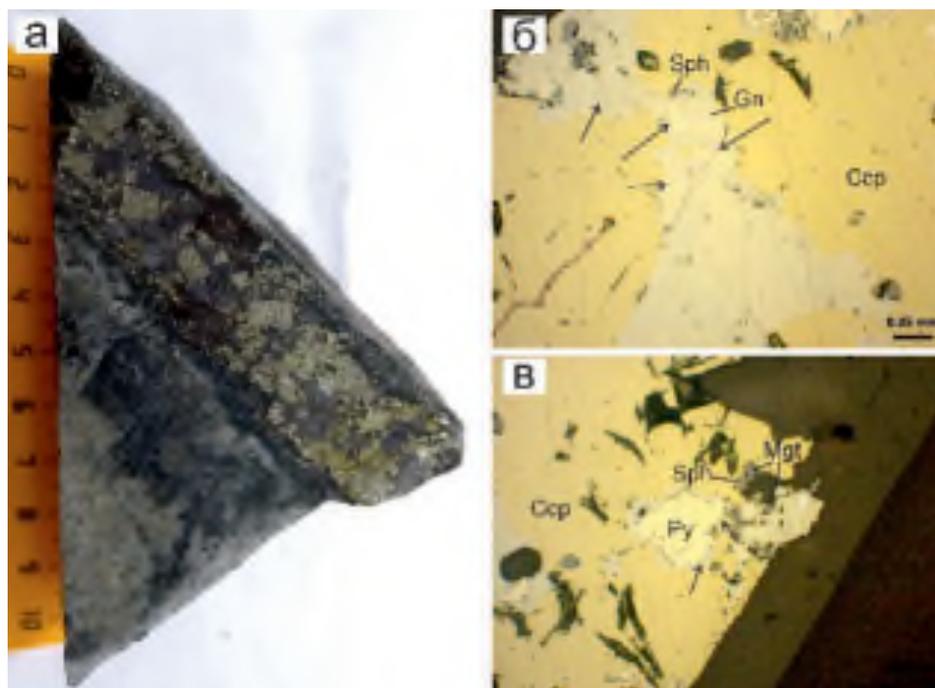


Рис. 5. Морфология висмутовых минералов: а – образец с висмутовой минерализацией; б – сростки халькопирита (Ccp) с галенит (Gn)-висмутовыми (стрелки) минералами и сфалеритом (Sph); в – сростки галенита с висмутовыми минералами (черная стрелка) по контуру кристалла пирита (Py) и на контакте халькопирита (Ccp) с жильными минералами. В халькопирите и айкините (белая стрелка) включения магнетита (Mgt) и сфалерита (Sph).

Рис. а – полированный образец; б, в – отраженный свет.

Fig. 5. Morphology of Bi minerals: а – sample with Bi minerals; б – intergrowths of chalcopyrite (Ccp) with galena (Gn)-bismuth (arrows) minerals and sphalerite (Sph); в – intergrowths of galena and Bi minerals (black arrow) along the contour of pyrite crystals (Py) and at the contact of chalcopyrite (Ccp) with vein minerals. Chalcopyrite and aikinite (white arrow) contain inclusions of magnetite (Mgt) and sphalerite (Sph).

Рис. а – полированный образец; б, в – отраженный свет.

гематит. Второстепенные и редкие минералы представлены арсенопиритом, пирротинном, теннантитом, минералами висмута, акантитом и самородным золотом.

Различаются три морфологических типа пирита: 1) крупные (до 5–6 мм) эвгедральные и субгедральные трещиноватые, пористые кристаллы с неровными краями и многочисленными включениями; 2) почковидные зерна размером 10–50 мкм в халькопирите, 3) эвгедральные кристаллы в халькопирите и жильной матрице (до 20 мкм). Халькопирит выполняет трещины в пирите и межзерновое пространство в нерудной матрице, образует эмульсионную вкрапленность, наиболее развитую по периметру и трещинам сфалерита. Сфалерит находится в сростаниях и включениях в халькопирите (до 30 мкм), пирите-1 (до 50 мкм), образует просечки и редко развивается по границе зерен халькопирита. В химическом составе сфалерита присутствует примесь Fe (1.89–4.9 мас. %), Cu (0.41 мас. %), Mn (0.22–0.34 мас. %) (табл. 1).

Тонкозернистый мартитизированный магнетит развивается вокруг зерен халькопирита на контакте с нерудной матрицей, выполняет трещины в пирите и халькопирите, образует включения в сфалерите, пирите-1, халькопирите, галените, висмутовых минералах. Гематит образует тонкие включения в пирите, сфалерите и халькопирите и сростания с халькопиритом, галенитом и нерудными минералами.

Висмутовая минерализация представлена самородным висмутом, сульфосолями Ag-Bi, Ag-Pb-Bi, Pb-Bi, Cu-Bi, Cu-Pb-Bi, сульфотеллуридами Bi. Минералы висмута образуют сложные сростания между собой, а также с халькопиритом и галенитом (рис. 5б, в; рис. 6а–д).

Самородный висмут (Bi 97.88–99.7 мас. %) приурочен к краям зерен галенита, контактам пирита с галенитом и образует включения в пирите, где он может сростаться с галенитом. Самородный висмут встречается редко, образует зерна с близкими к изометричным сечениями. Размер зерен не превы-

Таблица 1

Химический состав основных рудных минералов (мас. %)

Table 1

Chemical composition of major ore minerals (wt. %)

№ п/п	№ анализа	S	Mn	Fe	Cu	Zn	Сумма	Кристаллохимическая формула
Пирит								
1	24370f	52.98	–	47.02	–	–	100.00	Fe _{1.02} S _{2.00}
2	24370b	53.15	–	46.85	–	–	100.00	Fe _{1.01} S _{2.00}
3	24437r	52.69	–	47.09	–	–	99.79	Fe _{1.03} S _{2.00}
Халькопирит								
4	24437h	34.04	–	30.87	35.09	–	100.00	Cu _{1.04} Fe _{1.04} S _{2.00}
5	24433d	34.90	–	30.24	34.71	–	99.85	Cu _{1.00} Fe _{0.99} S _{2.00}
Сфалерит								
6	20087c	33.10	0.34	4.9	–	60.79	99.12	(Zn _{0.90} Fe _{0.08} Mn _{0.01}) _{0.99} S _{1.00}
7	20087d	33.41	0.22	4.27	–	62.09	99.98	Zn _{0.91} Fe _{0.07} Mn _{0.004}) _{0.99} S _{1.00}
8	20087a	32.99	–	2.71	0.41	63.34	99.46	(Zn _{0.94} Fe _{0.05} Cu _{0.01}) _{1.00} S _{1.00}
9	24437j	33.56	–	1.89	–	64.50	99.95	(Zn _{0.94} Fe _{0.03}) _{0.97} S _{1.00}

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на S = 1 (сфалерит) и S = 2 (пирит, халькопирит). Здесь и в табл. 2, прочерк – не обнаружено.

Note. The crystal chemical formulas are calculated for S = 1 (sphalerite) and S = 2 (pyrite, chalcopyrite). Here and in Table 2, dash – not detected.

шает 10 мкм. В его составе иногда присутствует небольшая примесь Fe (1.58 мас. %), возможно, из-за его нахождения в пирите.

Наиболее распространенной является сервеллеит ± виттихенит–галенит–матильдит–айкинитовая ассоциация, распространенная в халькопирите или на контакте халькопирита с пиритом и кварцем (рис. 6а–д). Сервеллеит (?) Ag₄TeS образует изометричные выделения размером 10 мкм на контакте айкинита с матильдитом (рис. 6г, д). В составе сервеллеита установлена примесь Cu (5.44–5.6 мас. %), что отличает минерал от сервеллеита из места первой находки (Criddle et al., 1989) и близко к сервеллеиту из некоторых колчеданных месторождений (Novoselov et al., 2006).

Матильдит AgBiS₂ – один из наиболее распространенных висмутовых минералов, он образует решетчатые, изометричные, сложные, интерстиционные выделения в ассоциации с галенитом и айкинитом в халькопирите (рис. 6а–д), на контакте халькопирита с пиритом и сфалерита с нерудной матрицей, реже развит по трещинам и в виде включений в пирите. Для матильдита характерна структура распада с галенитом и включения виттихенита. Размер зерен матильдита достигает 20 мкм. В химическом составе присутствует примесь Fe (0.54–1.78 мас. %) и Cu (0.37–1.54 мас. %) (табл. 2).

Айкинит PbCuBiS₃ широко распространен, ассоциирует с халькопиритом, галенит–матильдитовым твердым раствором, сервеллеитом и виттихенитом (рис. 6а–д). Зерна айкинита характеризуются интерстиционной, изометричной, сложной формой. Минерал образует сростки с халькопиритом, выполняет трещины в пирите и нерудной матрице на контакте со сфалеритом. Размер зерен составляет около 50 мкм, на контакте халькопирита с кварцем отмечаются отдельные зерна размером 120 мкм. В составе айкинита диагностирована примесь Ag (3.79 мас. %), Te (0.94 мас. %) и Fe (0.28–0.54 мас. %) (табл. 2).

Виттихенит Cu₃BiS₃ диагностирован в виде включения в сложном сростке галенита, матильдита и айкинита (рис. 6а–в). Также виттихенит развивается по трещинам или цементирует их в халькопирите с другими минералами висмута. Зерна имеют вытянутую, сложную форму и размер до 20 мкм. В химическом составе может присутствовать Pb (3.9 мас. %), Fe (0.69–1.94 мас. %), Ag (1.04–1.58 мас. %) (табл. 2).

Серебро–свинец–висмутовые сульфосоли представлены густавитом, ширмеритом и эскимойтом (?). Густавит PbAgBi₃S₆ диагностирован в виде ангдрального включения размером 10–15 мкм в сфалерите (рис. 6е). Ширмерит AgPb₂Bi₃S₇ (?) и

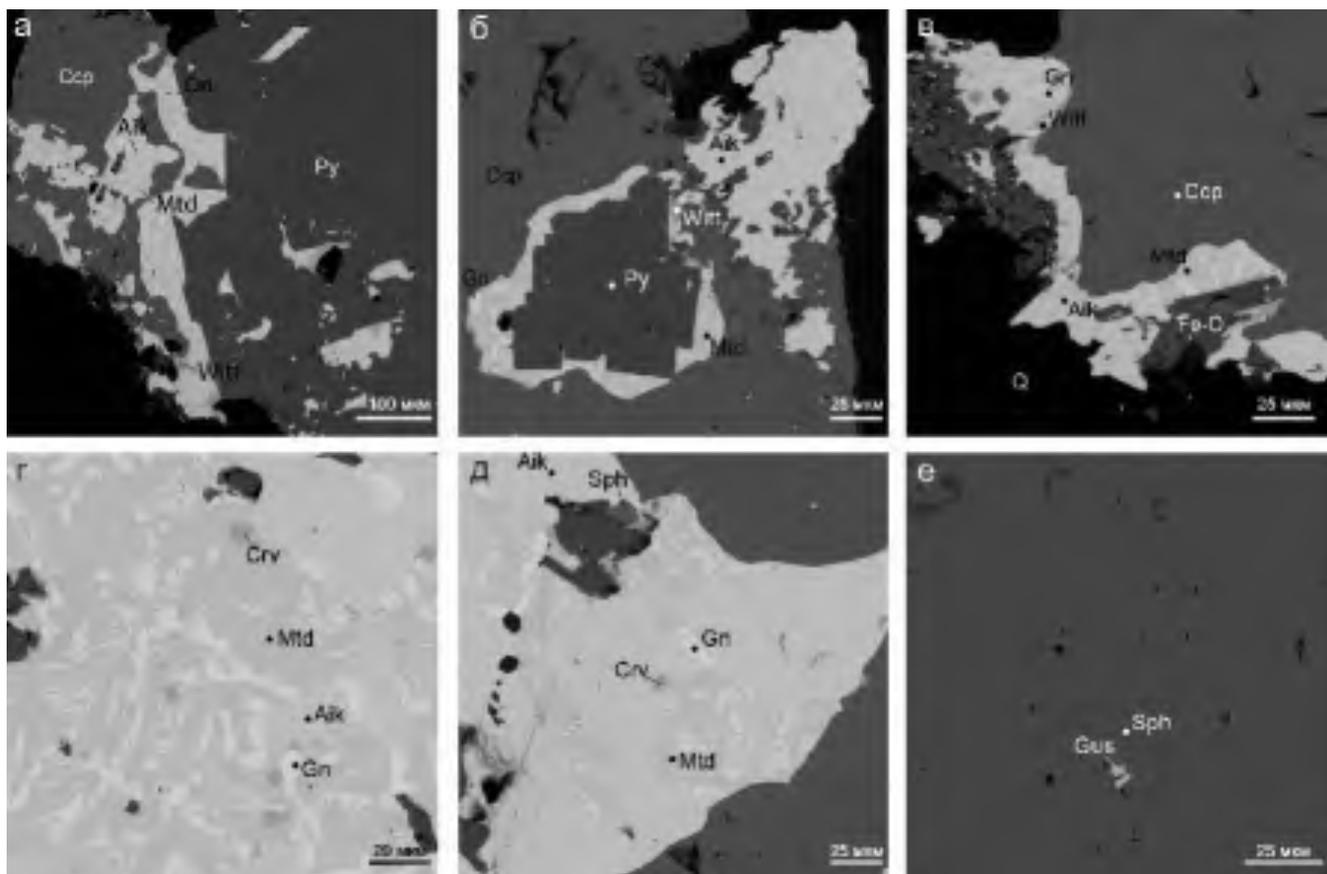


Рис. 6. Взаимоотношение минералов висмута между собой и с сульфидами Назаровского месторождения: а – сросток айкинита (Aik), галенита (Gn), матильдита (Mtd) и виттихенита (Witt) на контакте пирита (Py) с халькопиритом (Ccp); б – сросток виттихенита с матильдитом и галенитом на контакте пирита с халькопиритом и выделение айкинита на контакте халькопирита с нерудной матрицей; в – сросток галенита, виттихенита, айкинита и матильдита на контакте халькопирита с кварцем (Q) и оксидами железа (Fe-O); г – сросток сервеллеита (Crv), матильдита, айкинита и галенита; д – сросток айкинита, сфалерита (Sph), галенита, сервеллеита и матильдита в халькопирите; е – включение густавита (Gus) в сфалерите.

СЭМ фото.

Fig. 6. Relationship of bismuth minerals with each other and with sulfides of the Nazarovsky deposit: a – aggregate of aikinite (Aik), galena (Gn), matildite (Mtd), and wittichenite (Witt) at the contact of pyrite (Py) with chalcopyrite (Ccp); б – aggregate of wittichenite with matildite and galena at contact of pyrite with chalcopyrite and inclusions of aikinite at the contact of chalcopyrite with gangue matrix, в – intergrowth of galena, wittichenite, aikinite, and matildite at the contact of chalcopyrite with quartz (Q) and iron oxides (Fe-O); г – intergrowth of cervellite (Crv), matildite, aikinite, and galena; д – aggregate of aikinite, sphalerite (Sph), galena, cervellite, and matildite in chalcopyrite; e – inclusion of gustavite (Gus) in sphalerite.

SEM images.

эскимоит $Ag_7Pb_{10}Bi_{15}S_{36}$ (?) встречаются редко, образуют изометричные включения размером 20 мкм в халькопирите (ширмерит) и размером 10 мкм в пирите (эскимоит). В эскимоите присутствует примесь Fe (2.21 мас. %), возможно, из-за его нахождения в пирите и маленького размера самого зерна (табл. 2).

Козалит $Pb_2Bi_2S_5$ обнаружен в виде одного зерна каплевидной формы размером 150 мкм в кварцевом прожилке. Содержание серебра в составе минерала достигает 4.35 мас. % (табл. 2).

Сульфотеллуриды висмута представлены ингодитом (Bi_2TeS), который диагностирован в тонком сростке с галенитом и электрумом (Au 66.13–68.34 мас. %, Ag 31.48–33.54 мас. %) в виде включения в пирите. Размер зерна около 5 мкм. В химическом составе минерала присутствует примесь Fe 3.35 мас. % (табл. 2).

Кроме собственных минералов висмута, примесь Bi присутствует в галените и теннантите. Галенит образует срастания с халькопиритом, выполняет трещины и включения в пирите-1, сфалерите и

Таблица 2

Химический состав висмутсодержащих минералов и минералов Bi (мас. %)

Table 2

Chemical composition of Bi-bearing and Bi minerals (wt. %)

№ п/п	№ анализа	S	Fe	Cu	Ag	Pb	Bi	Zn	As	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула
Матильдит												
1	20154a	17.08	1.45	0.40	27.99	–	52.98	–	–	–	99.91	(Ag _{0.97} Cu _{0.02}) _{0.99} (Bi _{0.95} Fe _{0.10}) _{1.05} S _{2.00}
2	20154b	16.98	1.03	0.82	28.48	–	53.27	–	–	–	100.59	(Ag _{1.00} Cu _{0.05}) _{1.05} (Bi _{0.96} Fe _{0.07}) _{1.03} S _{2.00}
3	20154g	16.98	–	1.54	28.96	–	53.05	–	–	–	100.52	(Ag _{1.01} Cu _{0.09}) _{1.11} Bi _{0.96} S _{2.00}
4	20154d	16.53	–	–	28.27	–	55.03	–	–	–	99.84	Ag _{1.02} Bi _{1.02} S _{2.00}
5	24437b	16.93	1.78	–	29.48	–	51.69	–	–	–	99.88	Ag _{1.04} (Bi _{0.94} Fe _{0.12}) _{1.06} S _{2.00}
6	24437o'	17.20	0.80	1.21	29.05	–	51.54	–	–	–	99.81	(Ag _{1.00} Cu _{0.07}) _{1.07} (Bi _{0.92} Fe _{0.05}) _{0.97} S _{2.00}
7	24437l	17.05	–	0.37	30.45	–	52.04	–	–	–	99.92	(Ag _{1.06} Cu _{0.02}) _{1.08} Bi _{0.94} S _{2.00}
8	24437g	16.91	0.54	1.27	29.00	–	51.70	–	–	–	99.42	(Ag _{1.02} Cu _{0.08}) _{1.10} (Bi _{0.94} Fe _{0.04}) _{0.98} S _{2.00}
9	24433l	16.15	–	1.16	30.01	–	52.68	–	–	–	100.01	(Ag _{1.10} Cu _{0.07}) _{1.17} Bi _{1.00} S _{2.00}
10	24433e	17.16	–	–	29.79	–	52.84	–	–	–	99.79	Ag _{1.03} Bi _{0.94} S _{2.00}
Айкинит												
11	20154e	16.53	–	11.27	3.79	33.05	34.84	–	–	0.94	100.41	Cu _{1.03} (Pb _{0.93} Ag _{0.20}) _{1.13} (Bi _{0.97} Te _{0.04}) _{1.01} S _{3.00}
12	20154h	16.85	–	11.66	–	34.54	36.58	–	–	–	99.65	Cu _{1.05} Pb _{0.95} Bi _{1.00} S _{3.00}
13	24433f	16.18	–	11.74	–	41.37	30.46	–	–	–	99.76	Cu _{1.10} Pb _{1.19} Bi _{0.87} S _{3.00}
14	24433k	16.06	–	11.88	–	41.37	30.88	–	–	–	100.20	Cu _{1.12} Pb _{1.20} Bi _{0.89} S _{3.00}
15	24437d	15.86	0.54	11.92	–	41.40	30.15	–	–	–	99.86	Cu _{1.14} Pb _{1.21} Fe _{0.06} Bi _{0.88} S _{3.00}
16	24437k	16.24	0.28	11.62	–	41.07	30.69	–	–	–	99.91	Cu _{1.08} Pb _{1.17} Fe _{0.03} Bi _{0.87} S _{3.00}
17	24437p	15.98	–	11.85	–	41.42	30.42	–	–	–	99.66	Cu _{1.12} Pb _{1.20} Bi _{0.88} S _{3.00}
Виттихенит												
18	20154f	19.48	0.69	38.99	1.58	–	38.96	–	–	–	99.70	(Cu _{3.03} Ag _{0.07}) _{3.10} (Bi _{0.92} Fe _{0.06}) _{0.98} S _{3.00}
19	24437q	19.15	1.94	40.15	–	–	38.58	–	–	–	99.82	Cu _{3.17} (Bi _{0.93} Fe _{0.17}) _{1.10} S _{3.00}
20	24437f	18.93	1.40	40.18	1.40	–	38.20	–	–	–	100.10	(Cu _{3.21} Ag _{0.07}) _{3.28} (Bi _{0.93} Fe _{0.13}) _{1.06} S _{3.00}
21	24433m	18.31	0.91	40.71	1.04	–	38.87	–	–	–	99.85	(Cu _{3.37} Ag _{0.05}) _{3.42} (Bi _{0.98} Fe _{0.09}) _{1.06} S _{3.00}
22	24433i	18.81	–	38.11	1.18	3.9	37.95	–	–	–	99.94	(Cu _{3.07} Ag _{0.06}) _{3.13} (Bi _{0.93} Pb _{0.10}) _{1.03} S _{3.00}
Густавит												
23	20087b	17.19	–	–	10.18	19.00	53.62	–	–	–	100.00	Ag _{1.06} Pb _{1.03} Bi _{2.87} S _{6.00}
Ширмерит												
24	20154c	16.70	–	–	5.61	32.73	44.77	–	–	–	99.80	Ag _{0.70} Pb _{2.12} Bi _{2.88} S _{7.00}
Эскимоит												
25	24370a	15.53	2.21	–	9.98	24.74	47.42	–	–	–	99.88	Ag _{6.88} (Pb _{8.88} Fe _{2.94}) _{11.82} Bi _{16.87} S _{36.00}
Козалит												
26	24433j	17.58	–	–	4.35	36.77	38.16	–	–	–	96.86	(Pb _{1.62} Ag _{0.37}) _{1.99} Bi _{1.67} S _{5.00}
Ингодит												
27	24433p	5.18	3.35	–	–	–	70.65	–	–	20.86	100.04	Bi _{2.09} Fe _{0.37} Te _{1.01} S _{1.00}
Галенит												
28	24437e	12.99	0.40	1.06	1.84	82.16	2.46	–	–	–	100.91	(Pb _{0.98} Cu _{0.04} Ag _{0.04} Bi _{0.03} Fe _{0.02}) _{1.11} S _{1.00}
29	24437m	12.77	–	–	1.49	83.51	1.92	–	–	–	99.68	(Pb _{1.01} Ag _{0.03} Bi _{0.02}) _{1.06} S _{1.00}
30	24433n	13.27	–	–	1.24	85.19	–	–	–	–	99.69	(Pb _{0.99} Ag _{0.03}) _{1.02} S _{1.00}
31	24433g	13.53	–	–	2.21	83.94	–	–	–	–	99.68	(Pb _{0.96} Ag _{0.05}) _{1.01} S _{1.00}
Теннантит												
32	24437o	27.93	3.48	41.00	0.85	–	–	6.23	20.07	–	99.56	(Cu _{9.63} Ag _{0.12}) _{9.75} (Zn _{1.42} Fe _{0.93}) _{2.35} As _{4.0} S ₁₃
33	24433b	26.08	3.49	41.42	–	1.26	1.21	5.62	20.46	–	99.54	Cu _{10.42} (Zn _{1.37} Fe _{1.0} Pb _{0.1}) _{2.47} (As _{4.36} Bi _{0.09}) _{4.45} S ₁₃
34	24433c	25.55	3.41	41.80	–	1.67	2.86	6.08	18.42	–	99.79	Cu _{10.73} (Zn _{1.52} Fe _{1.0} Pb _{0.13}) _{2.65} (As _{4.01} Bi _{0.22}) _{4.23} S ₁₃

Примечание. Кристаллохимические формулы рассчитаны на S = 1 (галенит, ингодит), S = 2 (матильдит), S = 3 (виттихенит, айкинит), S = 5 (козалит), S = 6 (густавит), S = 7 (ширмерит), S = 13 (теннантит) и S = 36 (эскимоит).

Note. The crystal chemical formulas are calculated for S = 1 (galena, ingodite), S = 2 (matildite), S = 3 (wittihenite, aikinite), S = 5 (kozalite), S = 6 (gustavite), S = 7 (schirmerite), S = 13 (tennantite), and S = 36 (eskimoite).

нерудной матрице. В виде включений в пирите галенит образует как однородные зерна, так и сростания с самородным золотом и ингодитом. Галенит также формирует субграфические сростания с матильдитом в ассоциации с айкинитом и халькопиритом. В галените присутствуют тонкие включения сфалерита, халькопирита, пирита-3, магнетита, гематита. Размер зерен галенита сильно варьирует, достигая 100 мкм. В химическом составе галенита, ассоциирующем с минералами висмута, определены примеси Bi 1.92–2.46 мас. %, Ag 1.24–2.21 мас. %, Cu 1.06 мас. % и Fe 0.4 мас. % (табл. 2).

Теннантит образует реакционную кайму мощностью до 10 мкм между арсенопиритом и халькопиритом. Химический состав отвечает теннантиту-(Zn) (Biagioni et al., 2020), в котором атомные отношения $Zn / (Zn + Fe)$ варьируют в диапазоне 0.58–0.60. Примесь Bi достигает 2.86 мас. %, Pb – 1.67 мас. %, Ag – 0.85 мас. % (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Висмутовая минерализация является типоморфной для месторождений, ассоциирующих с интрузивами кислого состава (Дунин-Барковская, 1978; Mladenova et al., 2001; Cook, Ciobanu, 2004; Dimitrova, Kerestedjian, 2006; Ciobanu et al., 2010; Белогуб и др., 2010; Kołodziejczyk et al., 2015; Pmen et al., 2016; Прибавкин и др., 2018; Ятимов и др., 2019; Касаткин и др., 2023), в том числе для скарновых объектов. Нами впервые для Назаровского месторождения и в целом для Озернинского рудного узла охарактеризован широкий спектр сульфосолей висмута.

Температурным репером изученной рудной ассоциации является самородный висмут, температура плавления которого составляет 271 °С. Также в качестве индикатора температуры можно рассматривать галенит-матильдитовый твердый раствор, который является неограниченным при температурах выше 216 °С (Чвилева и др., 1988; Foord, Shawe, 1989). В изученных рудах галенит содержит примесь Ag до 2.21 мас. % и образует субграфические сростания с матильдитом, что свидетельствует о существовании твердого раствора, т. е. о температуре формирования этой минерализации, превышающей 216 °С и его последующем распаде. Низкая активность теллура в рудах подтверждается редкими находками сульфотеллуридов висмута (ингодит) и серебра (сервеллеит) и отсутствием собственно теллуридов.

Образование сульфидных руд Назаровского месторождения с висмутовой минерализацией, согласно результатам изучения флюидных включений происходило при температурах 360–245 °С и солености флюида 9.9–7.5 мас. % NaCl-экв. и хлоридно-магниево-калиевом и хлоридно-железистом солевом составе (Мунконов, Дамдинова, 2023). В этом ряду, учитывая особенности структуры руд, висмутовые сульфосоли формировались на завершающей наиболее низкотемпературной стадии формирования жил.

Сульфидные руды Назаровского месторождения являются продуктом скарнирования гидротермально-осадочных руд вблизи гранитоидной интрузии (Бусленко, Ковалев, 1975). Контактные изменения привели к перекристаллизации руд и их частичной регенерации. Подобные перекристаллизованные сульфидные руды известны на ряде рудопроявлений района, в том числе имеются их локальные проявления на гигантском Озерном месторождении (Дамдинов и др., 2023; Дамдинова и др., 2023), на котором по данным исследований флюидных включений из кварца перекристаллизация руд происходила в пределах температур 535–200 °С (Дамдинова и др., 2023). Висмутовая минерализация в рудах Назаровского месторождения является, вероятно, продуктом наложенного скарнового этапа.

ЛИТЕРАТУРА

- Базаров Э.Б., Кислов Е.В. (2011) Зона окисления Назаровского золото-цинкового месторождения (Западное Забайкалье). *Минерагеня Северо-Восточной Азии: материалы II Всероссийской научно-практической конференции*. Улан-Удэ, Экос, 22–24.
- Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А. (2010) Самородный висмут, цумоит и свинцовистая разновидность цумоита из Гарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал). *Записки Российского минералогического общества*, 139(6), 108–119.
- Бусленко А.И., Ковалев К.Р. (1975) Генетические особенности и метаморфизм руд Назаровского колчеданно-полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье). *Геология и геофизика*, 16(10), 73–82.
- Вольфсон Ф.И., Дружинин А.В. (1975) Главнейшие типы рудных месторождений. М., Недра, 392.
- Гордиенко И.В., Нефедьев М.А. (2015) Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения. *Геология рудных месторождений*, 57(2), 114–124. <https://doi.org/10.7868/S0016777015020021>

- Гордиенко И.В., Нефедьев М.А., Платов В.С. (2013) Строение, минеральные типы рудных месторождений и перспективы освоения Еравнинского рудного района западного Забайкалья. *Отечественная геология*, 42(1), 7–22.
- Дамдинов Б.Б., Викентьев И.В., Дамдинова Л.Б., Минина О.Р., Жмодик С.М., Соболев И.Д., Тюкова Е.Э., Спирина А.В., Извекова А.Д., Москвитина М.Л., Сажина Т.И., Бадмажапов Б.Б. (2023) Проблемы генезиса месторождений Озернинского полиметаллического рудного узла (Западное Забайкалье, Россия). *Отечественная геология*, (2), 73–90. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10010>
- Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Микентьев И.В., Реутский В.Н. (2023) Условия формирования перекристаллизованных руд Озерного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье, Россия). *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование*. Чита, 48–52.
- Дистанов Э.Г. (1977) Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск, Наука, 366 с.
- Дорошкевич А.Г. (2002ф) Результаты поисковых работ на полиметаллы в южной части Кыджимитского рудного узла и подсчет запасов золото-полиметаллического оруденения Назаровского месторождения на 1.03.2002 (Озернинский рудный узел).
- Дунин-Барковская Э.А. (1978) Геохимия и минералогия висмута (Чаткало-Кураминские горы). Ташкент, Фан УзССР, 272 с.
- Касаткин А.В., Белогуб Е.В., Кузнецов А.М., Новоселов К.А., Шкода Р., Нестола Ф., Рогов Д.А. (2023) Висмутовые минералы Юго-Конеевского и Пороховского месторождения вольфрама (Южный Урал). *Минералогия*, 9 (3), 26–49. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-3>
- Ковалев К.Р., Баулина М.В., Акимцев В.А., Аношин Г.Н. (2003) Стратиформные цинково-колчеданные руды и золоторудная минерализация на Назаровском месторождении (Западное Забайкалье). *Геология и геофизика*, 44 (10), 963–978.
- Мунконов Э.Ч.-Д., Дамдинова Л.Б. (2023) Золото-полиметаллические руды Назаровского месторождения (Западное Забайкалье). *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование*. Чита, 75–77.
- Назаровское месторождение [Электронный ресурс]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4013ce0> (дата обращения 6.06.2024)
- Нефедьев М.А. (2009) Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 184 с.
- Озерное месторождение [Электронный ресурс]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=9ca8e2d2ab6e71575d82c482dcff2688> (дата обращения 6.06.2024)
- Платов В.С., Игнатов А.М., Патрахин Е.Г. и др. (2013ф) Отчет о результатах работ по объекту № 9 (код 13-66) «ГДП-200 листа N-49-XXVIII (Еравнинская площадь)».
- Прибавкин С.В., Сустанов С.Г., Готтман И.А. (2018) Сульфосоли висмута березовского рудного района: химический состав и минеральные ассоциации. *Литосфера*, 18(3), 445–458. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-3-445-458>
- Пятилов М.М., Жданов А.В. (2014ф) Отчет о результатах геологоразведочных работ на Назаровском золото-сульфидно-цинковом месторождении в 2006–2012 гг. с подсчетом запасов полезных ископаемых по категории С₁ и С₂ по состоянию на 01.01.2014.
- Рыжкова Ю.А. (2020) Минералогия руд Назаровского цинкового месторождения (Озернинский рудный узел, Бурятия). *Металлогения древних и современных океанов-2020. Критические металлы в рудообразующих системах*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 98–102.
- Чвилева Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешникова О.Л. (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М., Недра, 504 с.
- Ятимов У.А., Аюпова Н.Р., Блинов И.А., Котляров В.А. (2019) Висмутовые минералы сульфидно-магнетитовых руд месторождения Акташ (Западный Кармазар, Таджикистан). *Минералогия*, 5(4), 28–40. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-4-4>
- Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moelo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist*, 105(1), 109–122. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>
- Christy A. (2015) Causes of anomalous mineralogical diversity in the Periodic Table. *Mineralogical Magazine*, 79(1), 33–49. <https://doi.org/10.1180/minmag.2015.079.1.04>
- Ciobanu C., Birch W., Cook N., Pring A., Grundler P. (2010) Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia. *Lithos*, 116(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.004>
- Ciobanu C., Cook N.J., Damian F., Damian G. (2006) Gold scavenged by bismuth melts: an example from Alpine shear-remobilizates in the Higis Massif, Romania. *Mineralogy and Petrology*, 87, 351–384. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0125-9>
- Cook N., Ciobanu C. (2004) Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic significance. *Mineralogical Magazine*, 68(2), 301–321. <https://doi.org/10.1180/0026461046820188>
- Criddle A.J., Chisholm J.E., Stanley C.J. (1989) Cerveleite, Ag₄TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photo-

chemical reaction involving cervelleite, acanthite and hessite. *European Journal of Mineralogy*, (1), 371–380. <https://doi.org/10.1127/ejm/1/3/0371>

Dimitrova D., Kerestedjian Th. (2006) Bismuth minerals in the postskarn sulphide-arsenide mineralization in the Martinovo iron deposit, NW Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 44, 19–32.

Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R. (2000) The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism. Sydney, Geological society of Australia, Australian Geological Convention.

Fitros M., Tombros S., Williams-Jones A., Tsikouras B., Koutsopoulou E., Hatzipanagiotou K. (2017) Physicochemical controls on bismuth mineralization: An example from Moutoulas, Serifos Island, Cyclades, Greece. *American Mineralogist*, 102, 1622–1631. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6125>

Foord E., Shawe D. (1989) The Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts: a review and some new data from Colorado, California, and Pennsylvania. *Canadian Mineralogist*, 27, 363–382.

Ilmen S., Alansari A., Baidada B., Maacha L., Bajddi A. (2016) Minerals of the Ag-Bi-Cu-Pb-S system from the Amensif carbonate-replacement deposit (western High Atlas, Morocco). *Journal of Geochemical Exploration*, 161, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.008>

Kołodziejczyk J., Pršek J., Melfos V., Voudouris P., Maliqi F., Kozub-Budzyń G. (2015) Bismuth minerals from the Stan Terg deposit (Trepça, Kosovo). *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, 192(3), 317–333. <https://doi.org/10.1127/njma/2015/0288>

Mladenova V., Kerestedjian Th., Dimitrova D. (2001) Ag-Cu-Pb-Bi mineralization from the Svishti Plaz gold deposit, Central Balkan Mountain, Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, (38), 55–66.

Novoselov K.A., Belogub E.V., Zaykov V.V., Yakovleva V.A. (2006) Silver sulfotellurides from volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Southern Urals. *Mineralogy and Petrology*, 87(3–4), 327–349. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0132-x>

Tooth B. (2013) The hydrothermal chemistry of bismuth and the liquid bismuth collector model. Adelaide, University of Adelaide, 125 p.

Voudoris H., Spry P.G., Melfos V., Alfieris D. (2007) Tellurides and bismuth sulfosalts in gold occurrences of Greece: mineralogical and genetic considerations. *Au-Ag Telluride-Selenide Deposits (Field Workshop)*. Finland, Espoo, 85–94.

Zhou H., Sun X., Fu Y., Lin H., Jiang L. (2016) Mineralogy and mineral chemistry of Bi-minerals: Constraints on ore genesis of the Beiya giant porphyry-skarn gold deposit, southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 79, 408–424. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.008>

REFERENCES

Bazarov E.B., Kislov E.V. (2011) The oxidation zone of the Nazarovskoe gold and zinc deposit (Western Transbaikalia). *Mineralogeniya Severo-Vostochnoy Azii: materialy «Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. (Mineralogy of Northeast Asia: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference)*. Ulan-Ude, Ekos, 22–24. (in Russian)

Belogub E.V., Moloshag V.P., Novoselov K.A., Kotlyarov V.A. (2010) Native bismuth, tsumoite, and Pb-bearing tsumoite from the Tarn'er copper-zinc-pyrite deposit (Northern Urals). *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 139 (6), 108–119. (in Russian)

Biagioni C., George L.L., Cook N.J., Makovicky E., Moelo Y., Pasero M., Sejkora J., Stanley C.J., Welch M.D., Bosi F. (2020) The tetrahedrite group: Nomenclature and classification. *American Mineralogist*, 105(1), 109–122. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7128>

Buslenko A.I., Kovalev K.P. (1975) Genetic features and metamorphism of ores of the Nazarovsky pyrite-polymetallic deposit (Western Transbaikalia). *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 16(10), 73–82. (in Russian)

Christy A. (2015) Causes of anomalous mineralogical diversity in the Periodic Table. *Mineralogical Magazine*, 79(1), 33–49. <https://doi.org/10.1180/minmag.2015.079.1.04>

Chvileva T.N., Bezsmertnaya M.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zav'yalov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Sveshnikova O.L. (1988) Guide book of ore minerals in reflected light. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian)

Ciobanu C., Birch W., Cook N., Pring A., Grundler P. (2010) Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia. *Lithos*, 116 (1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.004>

Ciobanu C., Cook N.J., Damian F., Damian G. (2006) Gold scavenged by bismuth melts: an example from Alpine shear-remobilizates in the Higiş Massif, Romania. *Mineralogy and Petrology*, 87, 351–384. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0125-9>

Cook N., Ciobanu C. (2004) Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: Paragenesis and genetic significance. *Mineralogical Magazine*, 68(2), 301–321. <https://doi.org/10.1180/0026461046820188>

Criddle A.J., Chisholm J.E., Stanley C.J. (1989) Cervelleite, Ag₄TeS, a new mineral from the Bambolla mine, Mexico, and a description of a photochemical reaction involving cervelleite, acanthite and hessite. *European Journal of Mineralogy*, (1), 371–380. <https://doi.org/10.1127/ejm/1/3/0371>

- Gordienko I.V., Nefed'ev M.A. (2015) The Kurba–Eravna ore district of Western Transbaikalia: geological and geophysical structure, types of ore deposits, predictive assessment, and mineral resource potential. *Geology of Ore Deposits*, 57(2), 101–110. <https://doi.org/10.1134/S1075701515020026>
- Gordienko I.V., Nefed'ev M.A., Platov V.S. (2013) Structure, mineral types of ore deposits and prospects for exploration of the Eravna ore region of Western Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya (Domestic Geology)*, 42(1), 7–22. (in Russian)
- Damdinova L.B., Vikentiev I.V., Damdinova L.B., Minina O.R., Zhmodik S.M., Sobolev I.D., Tyukova E.E., Spirina A.V., Izvekova A. D., Moskvitina M.L., Sazhina T.I., Badmazhapov B.B. (2023) Problems of genesis of deposits of the Ozerninsky polymetallic ore cluster (Western Transbaikalia, Russia). *Otechestvennaya geologiya (Domestic Geology)*, (2), 73–90. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10010> (in Russian)
- Damdinova L.B., Damdinov B.B., Vikentiev I.V., Reutskiy V.N. (2023) Formation conditions of recrystallized ores of the Ozernoe polymetallic deposit (Western Transbaikalia, Russia). *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnyh territoriy. Ratsional'noe prirodopol'zovanie (Mineralogy and Geochemistry of Landscape of Mining Territories. Rational Use of Natural Resources)*. Chita, 48–52. (in Russian)
- Dimitrova D., Kerestedjian Th. (2006) Bismuth minerals in the postskarn sulphide-arsenide mineralization in the Martinovo iron deposit, NW Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 44, 19–32.
- Distanov E.G. (1977) Polymetallic massive sulfide deposits of Siberia. Novosibirsk, Nauka, 366 c. (in Russian)
- Doroshkevich A.G. (2002) Unpublished report on results of exploration work for polymetals in the southern part of the Kyzhimit ore cluster and calculation of reserves of gold-polymetallic mineralization of the Nazarovskoe deposit as of 01.03.2002 (Ozerninsky ore cluster). (in Russian)
- Douglas N., Mavrogenes J., Hack A., England R. (2000) The liquid bismuth collector model: an alternative gold deposition mechanism. Sydney, Geological society of Australia, Australian Geological Convention.
- Dunin-Barkovskaya E.A. (1978) Geochemistry and mineralogy of bismuth (Chatkal-Kurama Mountains). Tashkent, Fan UzSSR, 272 p. (in Russian)
- Fitros M., Tombros S., Williams-Jones A., Tsikouras B., Koutsopoulou E., Hatzipanagiotou K. (2017) Physicochemical controls on bismuth mineralization: An example from Moutoulas, Serifos Island, Cyclades, Greece. *American Mineralogist*, 102, 1622–1631. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6125>
- Foord E., Shawe D. (1989) The Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts: a review and some new data from Colorado, California, and Pennsylvania. *Canadian Mineralogist*, 27, 363–382.
- Ilmen S., Alansari A., Baidada B., Maacha L., Bajddi A. (2016) Minerals of the Ag-Bi-Cu-Pb-S system from the Amensif carbonate-replacement deposit (western High Atlas, Morocco). *Journal of Geochemical Exploration*, 161, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.008>
- Kasatkin A.V., Belogub E.V., Kuznetsov A.M., Novoselov K.A., Skoda R., Nestola F., Rogov D.A. (2023) Bismuth minerals from Yugo-Konevo and Porokhovskoe tungsten deposits (South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 9(3), 26–49. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-3-3> (in Russian)
- Kołodziejczyk J., Pršek J., Melfos V., Voudouris P., Maliqi F., Kozub-Budzyń G. (2015) Bismuth minerals from the Stan Terg deposit (Trepça, Kosovo). *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen*, 192(3), 317–333. <https://doi.org/10.1127/njma/2015/0288>
- Kovalev K.R., Baulina M.V., Akimtsev V.A., Anoshin G.N. (2003) Stratiform zinc massive sulfide ores and gold-ore mineralization on the Nazarovskoe deposit (Western Transbaikalia). *Geologiya i geofizika (Geology and Geophysics)*, 44(10), 963–978. (in Russian)
- Mladenova V., Kerestedjian Th., Dimitrova D. (2001) Ag-Cu-Pb-Bi mineralization from the Svishti Plaz gold deposit, Central Balkan Mountain, Bulgaria. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, (38), 55–66.
- Munkonov E.Ch-D., Damdinova L.B. (2023) Gold-polymetallic ores of the Nazarovskoe deposit (Western Transbaikalia). *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnyh territoriy. Ratsional'noe prirodopol'zovanie (Mineralogy and Geochemistry of Landscape of Mining Territories. Rational Use of Natural Resources)*. Chita, 75–77. (in Russian)
- Nazarovskoe deposit [electronic resource]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=d63bd630c3a0d64877dd8a1ea4013ce0> (date of access 06.06.2024) (in Russian)
- Nefed'ev M.A. (2009) Volumetric model and assessment of prospects of the Ozerninsky ore cluster based on geophysical data (Western Transbaikalia). Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 184 p. (in Russian)
- Novoselov K.A., Belogub E.V., Zaykov V.V., Yakovleva V.A. (2006) Silver sulfotellurides from volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Southern Urals. *Mineralogy and Petrology*, 87(3–4), 327–349. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0132-x>
- Ozernoe deposit [electronic resource]. URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp?obj=9ca8e2d2ab6e71575d82c482dceff2688> (date of access 06.06.2024) (in Russian)
- Platov V.S., Ignatov A.M., Patrakhin E.G. et al. (2013) Unpublished report on results of work on object no. 9 (code 13-66) «GDP-200 of sheet N-49-XXVIII (Eravna area)». (in Russian)
- Pribavkin S.V., Sustavov S.G., Gottman I.A. (2018) Bismuth sulfosols of the Berezovsky ore region: chemical composition and mineral associations. *Litosfera (Lithosphere)*, 18(3), 445–458. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-3-445-458>

Pyatilov M.M., Zhdanov A.V. (2014) Unpublished report on results of geological exploration at the Nazarovskoe gold-sulfide-zinc deposit in 2006–2012 with an estimation of mineral reserves in categories C₁ and C₂ as of 01.01.2014. (in Russian)

Ryzhkova Yu.A. (2020) Mineralogy of the Nazarovskoe zinc deposit (Ozerninsky ore cluster, Republic of Buryatia). *Metallogeniya drevnih i sovremennykh okeanov-2020. Kriticheskie metally v rudoobrazuyushchih sistemah (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2020. Critical Metals in Ore-Forming Systems)*. Miass, YuU FNTS MiG UrO RAN, 98–102. (in Russian)

Tooth B. (2013) The hydrothermal chemistry of bismuth and the liquid bismuth collector model. Adelaide, University of Adelaide, 125 p.

Volfson F.I., Druzhinin A.V. (1975) The main types of ore deposits. Moscow, Nedra, 392. (in Russian).

Voudoris H., Spry P.G., Melfos V., Alfieris D. (2007) Tellurides and bismuth sulfosalts in gold occurrences of Greece: mineralogical and genetic considerations. *Au-Ag Telluride-Selenide Deposits (Field Workshop)*. Finland, Espoo, 85–94.

Yatimov U.A., Ayupova N.R., Blinov I.A., Kotlyarov V.A. (2019) Bismuth minerals of sulfide-magnetite ores from the Aktash deposit (Western Karamazar, Tajikistan). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 5 (4), 28–40. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2019-5-4-4> (in Russian)

Zhou H., Sun X., Fu Y., Lin H., Jiang L. (2016) Mineralogy and mineral chemistry of Bi-minerals: Constraints on ore genesis of the Beiya giant porphyry-skarn gold deposit, southwestern China. *Ore Geology Reviews*, 79, 408–424. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.008>

Информация об авторах

Рыжкова Юлия Алексеевна – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; padushina@mail.ru

Новоселов Константин Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; const31@yandex.ru

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; miha_rassomahin@mail.ru

Рожкова Елена Александровна – инженер, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; rozhkova95.lena@yandex.ru

Information about the authors

Julia A. Ryzhkova – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; padushina@mail.ru

Konstantin A. Novoselov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; const31@yandex.ru

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; miha_rassomahin@mail.ru

Elena A. Rozhkova – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, Russia; rozhkova95.lena@yandex.ru