

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КИНОВАРИ И МЕТАЦИННАБАРИТА ИЗ РОССЫПЕЙ СРЕДНЕГО УРАЛА И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ КОРЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ

© 2024 г. А. К. Козин*, д. чл. С. Ю. Степанов, Р. С. Паламарчук, А. В. Корнеев,
В. С. Жданова

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
территория Ильменский заповедник, Миасс, 456317 Россия
e-mail: kozin@mineralogy.ru

Поступила в редакцию: 21.03.2024 г.

После доработки: 06.05.2024 г.

Принята к публикации: 17.06.2024 г.

В статье приведены результаты исследования состава и внутреннего строения киновари из отложений трех золотоносных россыпей и деловия коренного рудопроявления рутиты на Среднем Урале. Установлены различия в размере и степени окатанности зерен киновари. Киноварь россыпи реки Извѣстка отличается от других изученных объектов крупным размером зерен (до 2.5 мм) и высокой степенью окатанности, что в сочетании с низкой механической устойчивостью указывает на расположение коренного источника на небольшом удалении. Выявлены значительные различия в наборе минералов, образующих включения в киновари. Повсеместно распространены включения кварца и кальцита. Самой контрастной относительно других объектов является ассоциация включений в киновари золотоплатиновой россыпи реки Извѣстка. Она отличается широким распространением редких минералов системы Zn–Hg–Cd–S, среди которых Cd-содержащий метациннабарит, Zn–Cd-содержащий метациннабарит, Hg-содержащий сфалерит. Впервые обнаружен Cd-содержащий метациннабарит с содержанием кадмия до 19.45 мас. % (0.34 к. ф.), который близок по составу синтезированным фазам (Hg, Cd)S. Совокупность данных о строении и составе киновари не позволяет предположить генетическую принадлежность коренных источников большинства россыпей. Однако типоморфные характеристики и, в особенности, включения редких сульфидов Hg, Cd и Zn в киновари из отложений реки Извѣстка указывают на расположение вблизи россыпи коренного источника с золото-рутутным оруденением, схожего с Воронцовским золоторудным месторождением.

Ключевые слова: россыпи, киноварь, метациннабарит, Hg-содержащий сфалерит, система Zn–Hg–Cd–S, золото, коренные источники

DOI: 10.31857/S0869605524040018, **EDN:** PDPMHC

ВВЕДЕНИЕ

Киноварь является одним из распространенных минералов шлиховых ассоциаций россыпных месторождений и проявлений. В пределах Уральского региона этот минерал отмечен в шлихах из множества золотоносных россыпей, расположенных в различных структурно-тектонических зонах.

Киноварь обладает уникальным набором физико-химических характеристик, значительно отличающих ее от прочих типичных минералов шлиховой ассоциации.

С одной стороны, химическая устойчивость киновари и повышенный относительно породообразующих минералов удельный вес обуславливают ее накопление в делювиальных, делювиально-аллювиальных и аллювиальных отложениях совместно с другими минералами тяжелой фракции. С другой стороны, при транспортировке киноварь довольно легко разрушается из-за ее низкой абразивной прочности (Кухаренко, 1961).

Вследствие этого киноварь, в отличие от большинства минералов, распространенных в россыпях и устойчивых в условиях дальней транспортировки, сохраняется лишь на незначительных расстояниях от коренных источников, а следовательно, характеризует области сноса, расположенные в непосредственной близости.

Другой важной особенностью киновари является ее частая генетическая и пространственная связь с золотым оруденением. Киноварь отмечена в составе руд многих месторождений коренного золота Урала (Сазонов и др., 2001), при этом ее собственные месторождения отсутствуют. Такое сочетание физико-химических свойств киновари и часто наблюдаемой парагенетической связи с самородным золотом обуславливают высокое прогнозно-поисковое значение этого минерала для коренных месторождений золота.

Единственным крупным золоторудным месторождением на Урале, на котором доказана пространственная и генетическая связь самородного золота с киноварной минерализацией, является Воронцовское месторождение, залегающее в восточной части Тагильской вулканогенной зоны во флекуре на контакте вулканогенно-осадочных пород и известняков.

Учитывая пространственную и возможную генетическую связь ртутной (киноварной) и золоторудной минерализации, была поставлена цель изучить киноварь из россыпей, формирующихся на структурно-вещественных комплексах, аналогичных по строению Ауэрбаховскому рудному узлу, в структурах которого располагается Воронцовское месторождение. Для сопоставления и выделения типоморфных признаков киновари были изучены шлиховые ассоциации минералов из россыпей, дренирующих области с развитием золото кварцевого и медно-порфирирового типов рудной минерализации.

Полученные результаты расширяют представления об использовании киновари в поисковых целях и позволяют прогнозировать обнаружение новых месторождений золота на основании типоморфизма киновари и минералов ртути из россыпных ассоциаций.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РОССЫПЕЙ И РАЙОНОВ ИХ ПИТАНИЯ

Формирование ртутной и золото-ртутной минерализации контролируется литологическими, структурными и тектоническими факторами. На примере месторождений Альмаден (Palero-Fernández et al., 2015), Хайдарканское (Никифоров, 1969), Никитовское (Багатаев, Роговой, 2011), Гал-Хая (Парфенов, Кузьмин, 2001) отчетливо заметны черты геологического строения, определяющие локализацию ртутных и золото-ртутных руд: развитие антиклинальных складок, наличие контактов карбонатных пород с терригенными и вулканогенно-осадочными толщами, высокая степень тектонической нарушенности региона. В пределах Уральской складчатой зоны примером объекта, сочетающего эти факторы, является Воронцовское месторождение, на котором отмечается тесная связь самородного золота с киноварью и другими минералами ртути (Kasatkin et al., 2022). Установлено, что в формировании Воронцовского месторождения важную роль сыграли флюиды, отделившиеся от Ауэрбаховского габбродиорит-гранитового интрузива (Викентьев и др., 2016), следовательно, развитие магматизма среднего и кислого состава также является предпосылкой образования коренных объектов с ртутной минерализацией.

Для минералогического изучения и анализа были выбраны объекты в Тагильской и Восточно-Уральской тектонических зонах (рис. 1, а), в отложениях которых

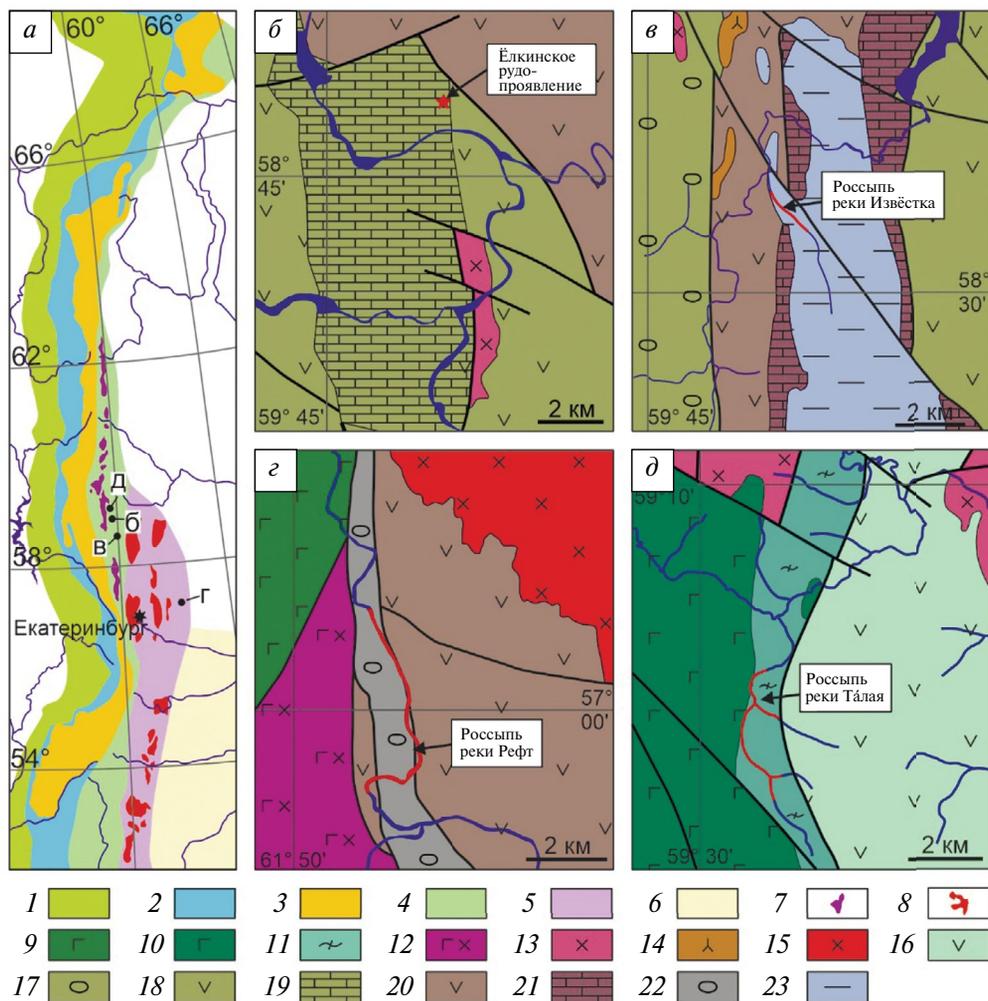


Рис. 1. Тектоническая позиция и геологическое строение районов исследования.

a — схема тектонического районирования Урала по (Пучков, 2010), *б–д* — геологическое строение районов исследования. 1 — Предуральский краевой прогиб, 2 — Западно-Уральская зона, 3 — Центрально-Уральская зона, 4 — Тагило-Магнитогорская зона, 5 — Восточно-Уральская зона, 6 — Зауральская зона, 7 — массивы Платиноносного Пояса, 8 — массивы Главной Гранитной Оси, 9 — вендские габбро дунит-харзбургит-габбровой формации, 10 — ордовикские габбро дунит-клинопироксенит-габбровой формации, 11 — ордовикские амфиболизированные долериты и габбро, 12 — силурийские габбродиориты, 13 — силурийские диориты и гранодиориты, 14 — силурийско-девонские сиениты, 15 — девонские диориты и граниты, 16 — ордовикские вулканогенно-осадочные толщи основного состава, 17 — силурийские терригенные породы, 18 — силурийские вулканогенно-осадочные толщи основного состава, 19 — силурийские известняки, 20 — девонские вулканогенно-осадочные толщи основного состава, 21 — девонские известняки, 22 — каменноугольные терригенные породы, 23 — юрские глины.

Fig. 1. Tectonic position and geological structure of the study areas.

a — tectonic zones of the Urals according to (Puchkov, 2010), *б–д* — geological structure of the study areas. 1 — Preuralian foredeep, 2 — West Uralian zone, 3 — Central Uralian zone, 4 — Tagilo-Magnitogorskian zone, 5 — East Uralian zone, 6 — Transuralian zone, 7 — Platinum-bearing Belt massifs, 8 — Main Granitic Axis massifs, 9 — Vendian gabbro of dunite-harzburgite-gabbro formation, 10 — Ordovician gabbro of dunite-clinopyroxenite-gabbro formation, 11 — Ordovician amphibolized dolerites and gabbro, 12 — Silurian gabbrodiorites, 13 — Silurian diorites and granodiorites, 14 — Silurian-Devonian syenites, 15 — Devonian diorites and granites, 16 — Ordovician mafic volcanic and sedimentary rocks, 17 — Silurian terrigenous rocks, 18 — Silurian mafic volcanic rocks, 19 — Silurian limestones, 20 — Devonian mafic volcanic and sedimentary rocks, 21 — Devonian limestones, 22 — Carboniferous terrigenous rocks, 23 — Jurassic clays.

присутствует киноварь: россыпи рек Извёстка и Рефт, делювиальная россыпь вблизи Ёлкинского рудопроявления. Данные водотоки дренируют структурно-вещественные комплексы, сочетающие перечисленные выше черты геологического строения, благоприятные для расположения коренных ртутных и золото-ртутных месторождений. В качестве объекта для сравнения, характеризующего отличающуюся геологическую обстановку, была выбрана россыпь реки Талая.

Ёлкинское проявление киновари располагается в западной части Тагильской островодужной зоны на восточном контакте силурийского Исовского карбонатного массива с вулканогенными толщами именовской свиты (рис. 1, б). В тектоническом отношении рудопроявление расположено на восточном крыле Ёлкинской антиклинали. К югу от рудопроявления расположен Ёлкинский граносиенитовый массив. Строение данной территории весьма схоже с геологической позицией Воронцовского месторождения. Киноварь образует прожилково-вкрапленную минерализацию в брекчированных известняках, сопровождающуюся гематитизацией пород (Корнеев и др., 2023). В ходе работ были опробованы элювиально-делювиальные глинистые отложения с многочисленными валунами известняков (рис. 2, а), перекрывающие рудопроявление.

Россыпь реки Извёстка относится к Мостовской группе россыпей и находится в Тагильской мегазоне в западной части Мостовской депрессии. Территория сложена ранне-средне девонскими известняками, граничащими с силурийско-девонскими вулканогенно-осадочными породами туринской свиты. Вулканиды туринской свиты прорываются штоками сиенитов силурийско-девонского возраста. Палеозойские породы частично перекрыты юрскими глинами лангурской свиты (рис. 1, в). Контакт девонских известняков с вулканогенно-осадочной толщей, а также развитие интрузивов среднего состава определяют сходство геологического строения этой территории с Ауэрбаховским рудным узлом. Россыпь является комплексной золото-платиновой и характеризуется сложным многоуровневым строением. Киноварь сопутствует промышленной благороднометалльной шлиховой минерализации, приуроченной к неогеновым и современным аллювиальным отложениям русловой части (рис. 2, б). Источником платиноидов в россыпи являлось в существенной части хромит-платиновое оруденение Светлоборского массива (Паламарчук, 2023), коренные источники самородного золота и киновари не установлены.

Россыпь реки Рефт расположена в Алапаевско-Сухоложском тектоническом блоке в центральной части Восточно-Уральской мегазоны (Пучков, 2010). Долина реки протягивается с севера на юг вблизи западного контакта ранне-средне девонского Алтынайского гранитоидного массива, прорывающего вулканогенные и осадочные (в том числе карбонатные) породы девона и раннего карбона (рис. 1, г). В породах массива известны проявления меди и молибдена, относимые к порфиоровому типу (Грабежев, Смирнов, 2012). Совокупность этих проявлений объединена в Артёмо-Алтынайский рудный узел, имеющий многочисленные сходные черты со структурно-вещественными комплексами, вмещающими Воронцовское месторождение. В нескольких километрах выше по течению реки Рефт располагается субмеридиональная полоса мелких жильных и прожилково-вкрапленных золото-кварцевых месторождений. Коренные объекты с ртутной минерализацией в районе не известны. Россыпь относится к долинному типу, в приплотиковой части разреза современных аллювиальных отложений выявлено присутствие шлихового золота и киновари (рис. 2, в), однако промышленные содержания на данный момент не установлены.

Россыпь реки Талая входит в состав золотоносных россыпей Мурзинской группы. В тектоническом отношении она расположена в Тагильской вулканической зоне, ее геологическая позиция отлична от остальных исследуемых объектов (рис. 1, д). Россыпь находится в пределах протяженной полосы позднеордовикских амфиболитов мариинского метаморфического комплекса и раннесилурийских вулканидов кабанской

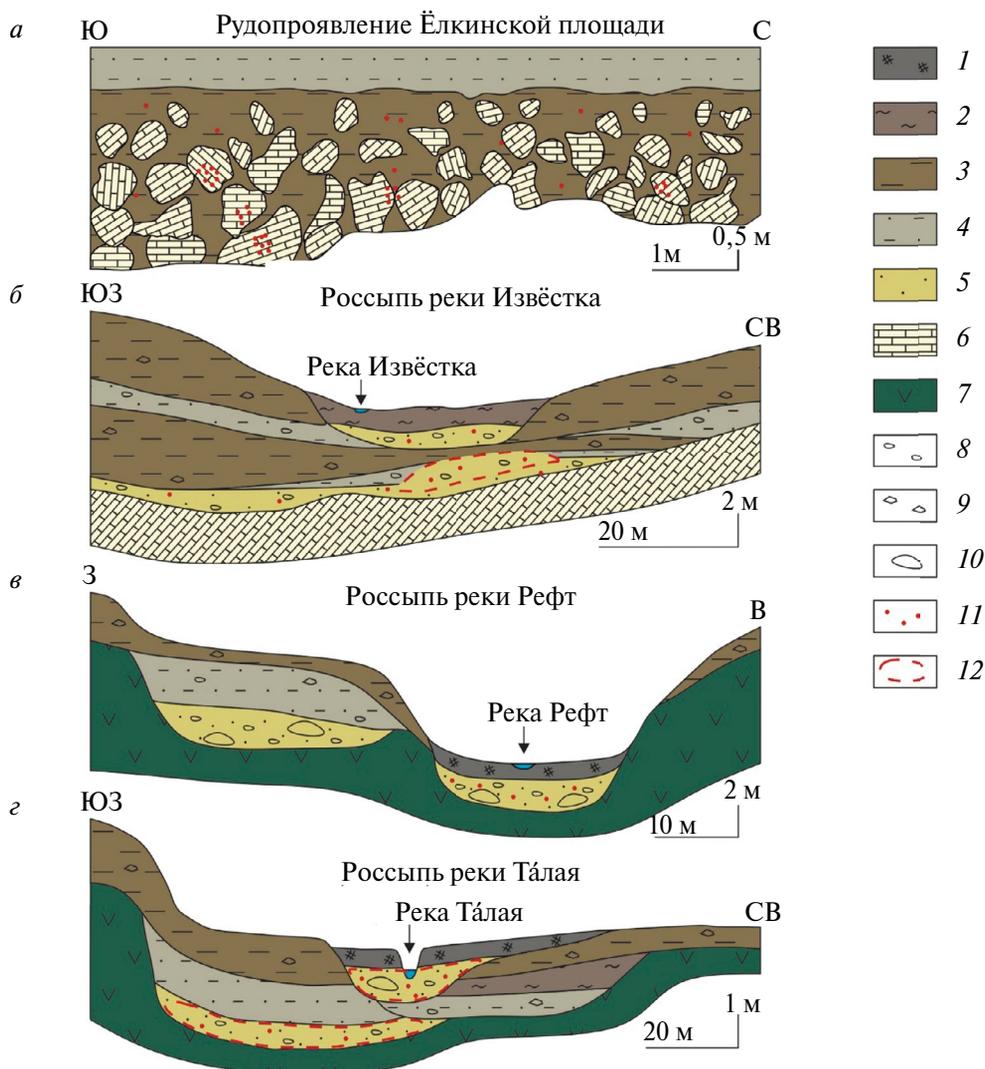


Рис. 2. Геолого-литологические разрезы россыпей.

a – Ёлкинское рудопоявление ртути, *б* – россыпь реки Извёстка, *в* – россыпь реки Рефт, *г* – россыпь реки Талая, 1 – торфа, 2 – илы, 3 – глины, 4 – суглинки, 5 – супеси и пески, 6 – известняки, 7 – вулканогенно-осадочные породы, 8 – галька, 9 – щебень, 10 – валуны, 11 – киноварь, 12 – отложения с промышленными содержаниями золота и платиноидов.

Fig. 2. Geological sections of placers.

a – Yolkinskoe mercury occurrence, *б* – Izvyostka River placer, *в* – Reft River placer, *г* – Talaya River placer, 1 – peat, 2 – silt, 3 – clay, 4 – loam, 5 – sandy loam and sand, 6 – limestone, 7 – volcanic rocks, 8 – pebbles, 9 – breakstone, 10 – boulders, 11 – cinnabar, 12 – commercial content of gold and platinum group metals.

свиты. Вулканыты вмещают множество комагматичных субвулканических образований риодацитов и долеритов. С востока территория ограничена Павдинским базитовым массивом, а с севера – Каменским диоритовым интрузивом. Киноварь обнаружена в золотоносных четвертичных и неогеновых аллювиальных отложениях в долине реки Талая, представленных супесями и песками с небольшим количеством гальки (рис. 2, г).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Промытые до черного шлиха пробы высушивались, после чего из них были извлечены зерна киновари. Киноварь была изучена с помощью бинокулярного микроскопа, после чего зерна были смонтированы в шайбы, а их поверхность отшлифована. Плоские срезы были изучены с применением поляризационного микроскопа и сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N, оснащенного спектрометром Oxford Instruments X-Max 20 (РЦ «Геомодель» СПбГУ, аналитик В. В. Шиловских). Состав минералов проанализирован с помощью микроанализатора Cameca SX100 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, аналитик В. А. Булатов) при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда 10 и 40 нА с использованием кристалл-анализаторов TAP, LPET, PET, LLIF, LIF. В качестве стандартов использовались: пирит (для анализа содержания Fe и S), HgTe (Hg, Te), ZnS (Zn), CdS (Cd), PbS (Pb), InAs (As). Время накопления импульсов в максимуме пика — 10 с, время накопления фонового сигнала слева и справа от анализируемой линии — 5 с. Всего изучено более 150 зерен киновари.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Размер и морфологические особенности киновари. Изученные зерна киновари значительно различаются по размеру и форме. В шлихах из россыпей рек Рефт и Талая, а также Ёлкинского рудопоявления широко распространены мелкие зерна размером 100—150 мкм, максимальный размер индивидов достигает 200 мкм. Форма зерен сложная, угловатая с многочисленными сколами, редко наблюдаются элементы кристаллографической огранки, при этом индивиды окатаны очень слабо (рис. 3, а–в). Существенно отличается киноварь из отложений россыпи реки Извѣстка. Размер зерен варьирует от 0.5 до 2.5 мм с преобладанием класса крупности 1—2 мм. Характерной чертой является высокая степень окатанности киновари, реже встречаются средне и слабо окатанные индивиды (рис. 3, г). Форма зерен преимущественно слабо удлинённая, овальная. На поверхности часто отмечаются пленки и примазки черного и темно-коричневого цветов, сложенные метациннабаритом.

Химический состав киновари всех изученных объектов весьма схож (табл. 1). Характерной чертой является выдержанность состава во всех проанализированных зернах, вариации содержания серы и ртути не превышают 0.7 мас. %. Важно отметить значительное отклонение состава от теоретического, повсеместно в киновари наблюдается недостаток ртути на уровне 0.05—0.08 к. ф. Примеси в составе киновари обнаружены не были.

Таблица 1. Химический состав киновари, мас. %

Table 1. Chemical composition of cinnabar, wt %

Объект	S	Hg	Формула
река Рефт	$\frac{14.63 - 15.07}{14.80}$	$\frac{84.93 - 85.37}{85.20}$	Hg _{0.92} S _{1.00}
река Извѣстка	$\frac{14.42 - 15.15}{14.75}$	$\frac{84.85 - 85.58}{85.25}$	Hg _{0.92} S _{1.00}
Ёлкинское рудопоявление	$\frac{14.55 - 14.92}{14.76}$	$\frac{85.08 - 85.45}{85.24}$	Hg _{0.92} S _{1.00}
река Талая	$\frac{14.32 - 14.56}{14.46}$	$\frac{84.93 - 85.68}{85.54}$	Hg _{0.95} S _{1.00}

Примечание. Формулы рассчитаны на 1 атом серы. В знаменателе указаны границы изменения содержания элемента, в знаменателе — среднее содержание.

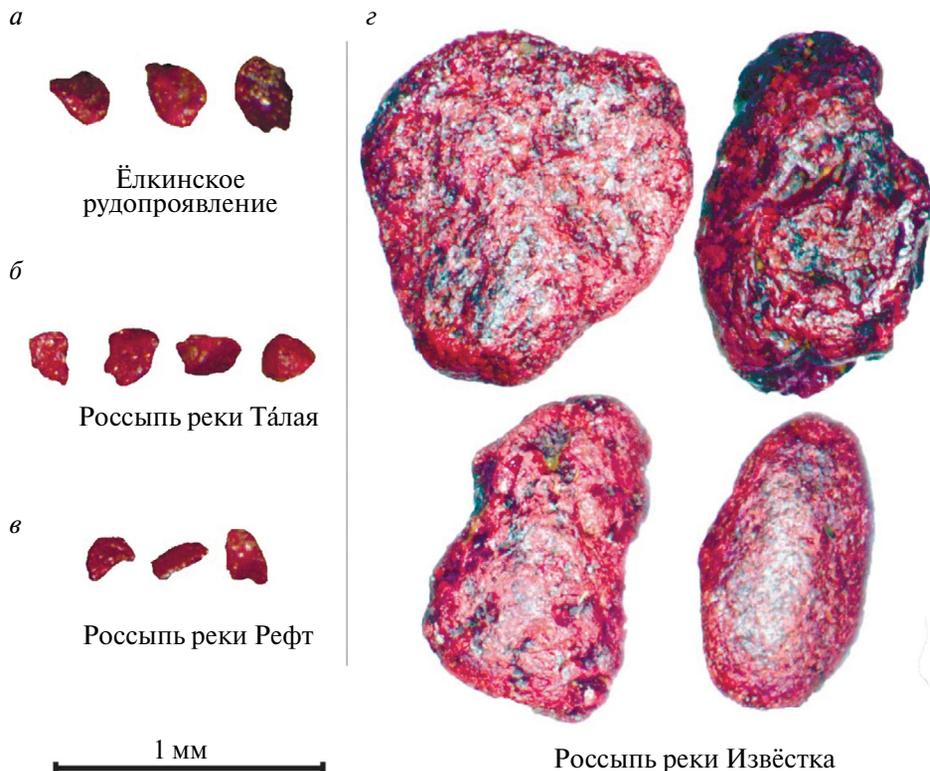


Рис. 3. Фотографии зерен киновари из отложений: *a* — элювиально-делювиальных Ёлкинского рудопроявления, *б* — аллювиальных реки Тала́я, *в* — аллювиальных реки Рефт, *з* — аллювиальных реки Извёстка.

Fig. 3. Photographs of cinnabar grains from various deposits: *a* — eluvium and diluvium of Yolkinskoe mercury occurrence, *б* — Talaya River alluvium, *в* — Reft River alluvium, *з* — Izyostka River alluvium.

Ассоциации минералов, образующих микровключения в киновари, в исследованных объектах отличаются (табл. 2). Общим для всех изученных ассоциаций являются кварц, образующий округлые, реже огранные включения (рис. 4, *в*). Широко распространены кальцит и гематит (рис. 4, *в*), среди сульфидов наиболее часто встречается пирит (рис. 4, *а*). Характерной особенностью киновари из россыпи реки Рефт являются включения хлорита, пирита и халькопирита. Отличительной чертой ассоциации включений киновари из отложений реки Тала́я является отсутствие сульфидов и относительно большое разнообразие силикатных минералов, представленных диопсидом, эпидотом, альбитом и титанитом (рис. 4, *з*). Киноварь из делювия Ёлкинского рудопроявления выделяется малым количеством включений ограниченного набора минералов.

Самой контрастной относительно других объектов является ассоциация включений в киновари золотоплатиновой россыпи реки Извёстка. Она отличается широким распространением редких минералов системы Zn–Hg–Cd–S, среди которых выделяются Zn–Cd-содержащий метациннабарит, Cd-содержащий метациннабарит и Hg-содержащий сфалерит. Данный парагенезис минералов был изучен наиболее детально.

Zn–Cd-содержащий метациннабарит образует многочисленные удлинённые включения размером от 5 до 100 мкм, обладающие сложным ограничением с отчётливыми неровными границами со вмещающей киноварью (рис. 5, *а*). Реже встречаются овальные вытянутые зерна со сглаженными краями размером 10–20 мкм, вокруг которых

Таблица 2. Ассоциации минералов-включений в киновари**Table 2.** Assemblages of mineral inclusions in cinnabar

Объект	Минералы включений			
	Оксиды	Силикаты	Сульфиды	Другие
Река Талая	Кварц Гематит	Диопсид Эпидот Альбит Титанит	–	Кальцит
Ёлкинское рудопроявление	Кварц	–	Пирит	Кальцит
Река Извёстка	Кварц Гематит	Мусковит	Пирит Халькопирит Zn-Cd-содержащий метациннабарит Cd-содержащий метациннабарит Hg-содержащий сфалерит	Кальцит Апатит
Река Рефт	Кварц Гематит	Хлорит	Пирит Халькопирит	Кальцит

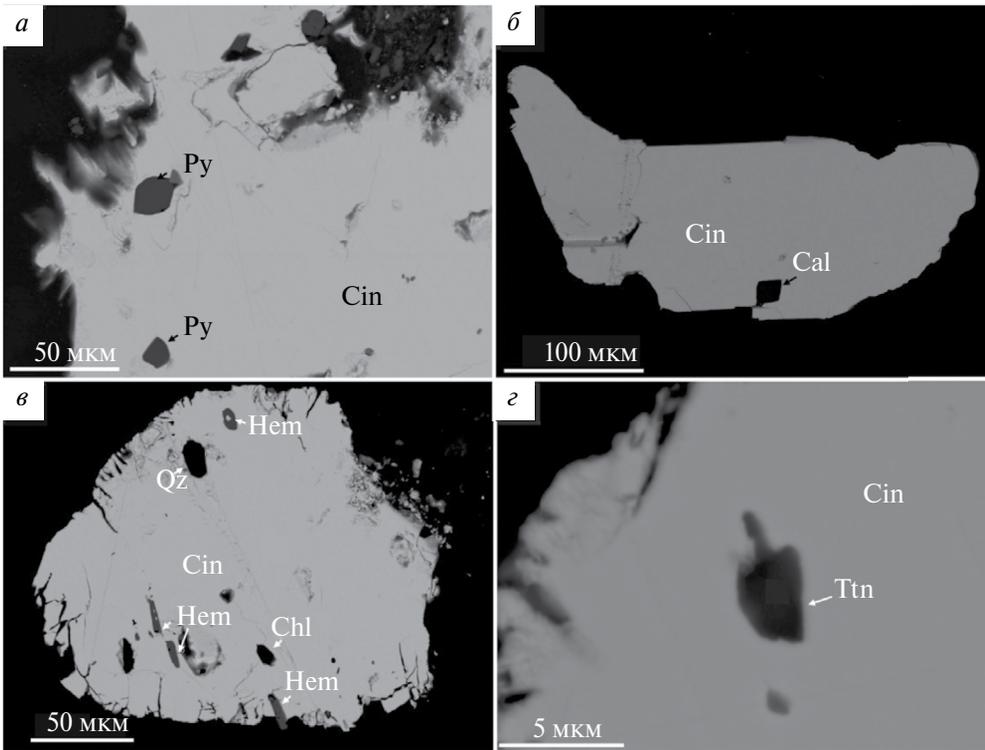


Рис. 4. Включения минералов в киновари. *a, б* — делювиальные отложения Ёлкинского рудопроявление, *в* — россыпь реки Рефт, *з* — россыпь реки Талая. Qz — кварц, Cal — кальцит, Ttn — титанит, Cin — киноварь, Py — пирит, Hem — гематит.

Fig. 4. Mineral inclusions in cinnabar. *a, б* — eluvium and diluvium of Yolkinskoe mercury occurrence, *в* — Reft River alluvium, *з* — Talaya River alluvium placer. Qz — quartz, Cal — calcite, Ttn — titanite, Cin — cinnabar, Py — pyrite, Hem — hematite.

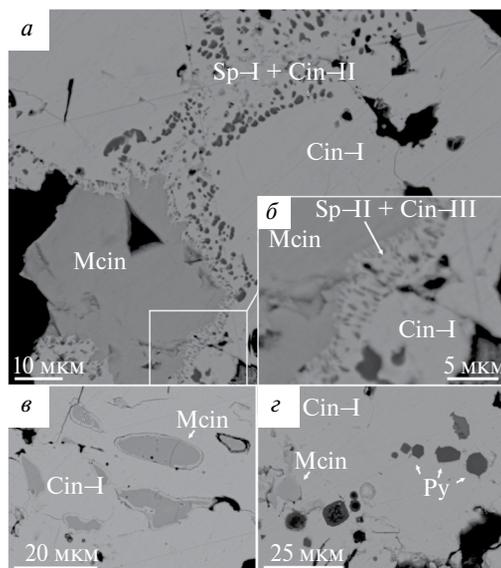


Рис. 5. Включения минералов в киновари из россыпи реки Извёстка. Cin — киноварь, Mcin — метациннабарит, Sp — сфалерит, Py — пирит.

Fig. 5. Mineral inclusions in cinnabar from Izvyostka River placer. Cin — cinnabar, Mcin — metacinnabar, Sp — sphalerite, Py — pyrite.

образуется кайма шириной в первые мкм (рис. 5, в), сложенная киноварью с примесью Zn (до 2.21 мас. %) или Cd (до 1.5 мас. %). Zn-Cd-содержащий метациннабарит характеризуется значительными вариациями состава (табл. 3) и высокими содержаниями Cd (0.11—0.23, среднее 0.17 к. ф.) и Zn (0.17—0.32, среднее 0.25 к. ф.). В нескольких зернах обнаружена примесь Fe (0.22—0.44 мас. %, 0.01 к. ф.). На сумму Zn+Cd приходится от 0.32 до 0.50 к. ф., среднее значение 0.42 к. ф.

Включения Cd-содержащего метациннабарита представлены угловатыми индивидами размером 40—100 мкм, рассеянными в матрице киновари. Вариации химического состава незначительны (табл. 3). Основной примесью является Cd (18.56—19.45 мас. %, 0.32—0.34 к. ф.), в меньших количествах установлен Zn (1.69—1.83 мас. %, 0.05—0.06 к. ф.).

Для включений ртутистого сфалерита установлены две морфологические разновидности. К первой разновидности отнесены округлые и слабо удлиненные зерна размером 2—10 мкм, редко имеющие частичное кристаллографическое ограничение, образующие скопления в матрице киновари (рис. 5, а). Химический состав ртутистого сфалерита первого типа характеризуется высоким содержанием Hg (13.14—25.77 мас. %, 0.07—0.15 к. ф.) и небольшой примесью Cd (0.59—2.06 мас. %, 0.1—0.2 к. ф.). В одном зерне выявлено присутствие Fe в количестве 0.19 мас. % (табл. 3).

Вторая разновидность ртутистого сфалерита представлена мелкими 1—2 мкм удлиненными зернами, слагающими вместе с киноварью каймы средней шириной 5 мкм вокруг зерен Zn-Cd-содержащего метациннабарита. Эти индивиды растут перпендикулярно границе киновари и метациннабарита внутрь последнего (рис. 5, б). Ввиду малого размера включений ртутистого сфалерита второго типа получить достоверные составы данного минерала не удалось, однако можно отметить присутствие в составе Hg и примеси Cd.

Таблица 3. Химический состав минералов системы Zn–Hg–Cd–S, образующих включения в киновари из золотоплатиновой россыпи реки Извѣстка, мас. %

Table 3. Chemical composition of mineral inclusions of the Zn–Hg–Cd–S system in cinnabar from the gold-platinum Izvyostka River placer, wt %

№ п/п	S	Fe	Zn	Cd	Hg	Сумма	Формула	
1	16.44	–	1.79	18.71	62.95	99.89	(Hg _{0.61} Cd _{0.32} Zn _{0.05}) _{0.98} S _{1.00}	
2	16.27		1.83	18.61	63.27	99.97	(Hg _{0.62} Cd _{0.33} Zn _{0.06}) _{1.01} S _{1.00}	
3	16.15		1.71	19.45	62.68	100.00	(Hg _{0.62} Cd _{0.34} Zn _{0.05}) _{1.01} S _{1.00}	
4	15.95		1.69	18.77	63.49	99.92	(Hg _{0.64} Cd _{0.34} Zn _{0.05}) _{1.03} S _{1.00}	
5	16.08		1.70	18.56	63.63	99.97	(Hg _{0.59} Cd _{0.20} Zn _{0.20}) _{0.99} S _{1.00}	
6	17.21		7.14	12.09	63.56	100.00	(Hg _{0.58} Cd _{0.23} Zn _{0.19}) _{1.00} S _{1.00}	
7	17.18		6.56	13.69	62.56	99.99	(Hg _{0.65} Zn _{0.25} Cd _{0.19}) _{1.09} S _{1.00}	
8	16.00		8.03	10.54	65.41	99.98	(Hg _{0.63} Zn _{0.28} Cd _{0.15}) _{1.06} S _{1.00}	
9	16.50		9.56	8.94	64.91	99.90	(Hg _{0.59} Zn _{0.32} Cd _{0.16}) _{1.07} S _{1.00}	
10	16.93		11.18	9.37	62.57	100.05	(Hg _{0.56} Zn _{0.27} Cd _{0.15}) _{0.98} S _{1.00}	
11	17.85		9.93	9.66	62.51	99.93	(Hg _{0.58} Zn _{0.31} Cd _{0.14}) _{1.03} S _{1.00}	
12	17.26		10.82	8.76	63.10	99.94	(Hg _{0.61} Zn _{0.31} Cd _{0.14}) _{1.06} S _{1.00}	
13	16.75		10.50	8.49	64.14	99.88	(Hg _{0.61} Zn _{0.31} Cd _{0.14}) _{1.06} S _{1.00}	
14	16.31		8.23	10.97	64.46	99.97	(Hg _{0.63} Zn _{0.25} Cd _{0.19}) _{1.07} S _{1.00}	
15	17.28	0.44	8.94	6.54	66.85	100.04	(Hg _{0.62} Zn _{0.25} Cd _{0.11} Fe _{0.01}) _{0.99} S _{1.00}	
16	16.64	0.22	9.69	7.90	65.51	99.97	(Hg _{0.62} Zn _{0.25} Cd _{0.11} Fe _{0.01}) _{1.07} S _{1.00}	
17	15.47	0.29	6.57	5.85	71.76	99.94	(Hg _{0.63} Zn _{0.29} Cd _{0.14} Fe _{0.01}) _{1.07} S _{1.00}	
18	18.72	–	9.53	11.03	60.72	100.00	(Hg _{0.74} Zn _{0.21} Cd _{0.11} Fe _{0.01}) _{0.99} S _{1.00}	
19	18.08		9.05	9.85	63.02		(Hg _{0.52} Zn _{0.25} Cd _{0.17}) _{0.94} S _{1.00}	
20	18.50		8.40	10.31	62.79		(Hg _{0.56} Zn _{0.25} Cd _{0.16}) _{0.97} S _{1.00}	
21	17.42		11.11	11.39	60.08		(Hg _{0.54} Zn _{0.22} Cd _{0.16}) _{0.92} S _{1.00}	
22	18.26		8.25	12.17	61.33	100.01	(Hg _{0.55} Zn _{0.31} Cd _{0.19}) _{1.05} S _{1.00}	
23	17.49		8.23	9.94	64.33	99.99	(Hg _{0.54} Zn _{0.22} Cd _{0.19}) _{0.95} S _{1.00}	
24	17.85		8.70	10.09	61.65	98.29	(Hg _{0.59} Zn _{0.23} Cd _{0.16}) _{0.98} S _{1.00}	
25	18.51		11.00	8.45	62.03	99.99	(Hg _{0.55} Zn _{0.24} Cd _{0.16}) _{0.95} S _{1.00}	
26	17.82		6.10	12.17	63.92	100.01	(Hg _{0.54} Zn _{0.29} Cd _{0.13}) _{0.96} S _{1.00}	
27	18.01		7.09	12.67	62.24		(Hg _{0.57} Cd _{0.19} Zn _{0.17}) _{0.93} S _{1.00}	
28	18.27		8.23	12.89	60.61	100.00	(Hg _{0.55} Cd _{0.20} Zn _{0.19}) _{0.94} S _{1.00}	
29	18.65		9.89	10.56	60.90		(Hg _{0.53} Cd _{0.22} Zn _{0.20}) _{0.95} S _{1.00}	
30	28.43		0.19	52.29	1.40	17.67	99.98	(Hg _{0.52} Cd _{0.26} Zn _{0.16}) _{0.94} S _{1.00}
31	28.19		52.32	1.33	17.92	99.76	(Zn _{0.90} Hg _{0.10} Cd _{0.01}) _{1.01} S _{1.00}	
32	29.33	50.76	1.90	18.02	100.01	(Zn _{0.91} Hg _{0.10} Cd _{0.01}) _{1.02} S _{1.00}		
33	28.54	48.35	2.06	18.98	97.93	(Zn _{0.85} Hg _{0.10} Cd _{0.02}) _{0.97} S _{1.00}		
34	28.26	49.05	0.59	21.61	99.51	(Zn _{0.83} Hg _{0.11} Cd _{0.02}) _{0.96} S _{1.00}		
35	29.38	50.67	1.09	18.85	99.99	(Zn _{0.85} Hg _{0.12} Cd _{0.01}) _{0.97} S _{1.00}		
36	29.68	55.31	1.87	13.14	100.00	(Zn _{0.85} Hg _{0.10} Cd _{0.01}) _{0.96} S _{1.00}		
37	26.91	46.46	0.86	25.77		(Zn _{0.91} Hg _{0.07} Cd _{0.02}) _{1.00} S _{1.00}		

Примечание. 1–5 – Cd-содержащий метациннабарит, 6–29 – Zn-Cd-содержащий метациннабарит, 30–37 – Hg-содержащий сфалерит. Формулы рассчитаны на 1 атом серы. Анализы 1–17, 30, 31 выполнены на микрозондовом анализаторе Samco SX100 (ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН); 18–29, 32–37 – на СЭМ Hitachi S-3400N с ЭДС спектрометром Oxford Instruments X–Max 20 (РЦ «Геомодель» СПбГУ).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование особенностей формы и внутреннего строения киновари из четырех россыпей позволило выделить сходства и различия киновари различных районов. При этом наибольшие отличия установлены для киновари из россыпи реки Извѣстка. Анализ установленных типоморфных характеристик киновари позволяет сделать предположения о генетической принадлежности ее коренных источников.

Первой особенностью, которая отчетливо выделяет киноварь из россыпи реки Извѣстка, является относительно крупный размер зерен. Индивиды из других изученных объектов на порядок меньше. При этом зерна из россыпей рек Талая и Рефт, а также делювиальных отложений Ёлкинского рудопоявления характеризуются слабой степенью окатанности, что указывает на расположение коренных источников в непосредственной близости и минимальный перенос. Напротив, киноварь реки Извѣстка окатана средне или хорошо. Как указывалось выше, одной из главных характеристик, определяющих поведение киновари при перемещении в рыхлых склоновых отложениях и водных потоках, является ее низкая абразивная устойчивость. Легкость разрушения индивидов в результате механического воздействия частиц более твердых минералов делает невозможной транспортировку киновари на большие расстояния. Скорость механического разрушения этого минерала в поверхностных обстановках наглядно видна на примере золотых россыпей в Новой Зеландии (Youngson et al., 2002), в которых при переносе зерен водотоками менее чем на 3 км их средний размер уменьшается от 1 см до 0.25 мм. Сочетание крупного размера и высокой степени окатанности киновари из отложений реки Извѣстка позволяет предполагать расположение коренного источника киновари на незначительном удалении от россыпи, вероятно, на расстоянии первых километров. В россыпи реки Извѣстка преобладают хорошо окатанные сильно уплощенные золотины, однако встречаются и слабо окатанные индивиды, срastaющиеся с кварцем. Такие различия могут быть объяснены существованием нескольких коренных источников золота, расположенных как вблизи россыпи, так и на значительном удалении. Данный факт позволяет предположить пространственное совмещение ртутной и золотой минерализации на небольшом расстоянии от россыпи реки Извѣстка.

Химический состав киновари всех изученных объектов схож и лишен примесных компонентов, следовательно, он не может быть использован в качестве типоморфного признака. Намного более информативными являются минералы, находящиеся во включениях. Ассоциации включений в киновари из россыпей рек Талая, Рефт и Ёлкинского рудопоявления различны и, вероятно, отражают особенности минералообразующей среды. Однако они состоят из распространенных гидротермальных минералов, образующихся в широких пределах составов, температур и других физических характеристик растворов, что затрудняет их интерпретацию.

Отдельного внимания заслуживает ассоциация включений в киновари россыпи реки Извѣстка, представленная сульфидами Hg, Cd и Zn. В системе Zn–Hg–Cd–S установлены сложные изоморфные взаимоотношения крайних членов и сосуществование нескольких полиморфных фаз (Васильев, 2011). Метациннабарит является высокотемпературной кубической полиморфной модификацией киновари, входящей в состав рудных ассоциаций ртутных и золото-ртутных месторождений. Особенности структуры кристаллической решетки метациннабарита позволяют ему, в отличие от киновари, вмещать большое количество изоморфных примесей Zn, Cd и Fe. Эксперименты в системе Hg–S (Potter, Barnes, 1970; Sharma et al., 1993) показали, что при давлении 1 бар метациннабарит стабилен при температурах выше 315–345 °С, а вариации нижней границы температуры стабильности зависят от множества физико-химических параметров. Повышение фугитивности серы вызывает понижение температуры полиморфного превращения, при этом с ростом давления температура превращения повышается (Таусон, Абрамович, 1980). Вхождение изоморфных примесей

Zn, Fe и других элементов в структуру метациннабарита делает его стабильным при более низких температурах (200—250 °С) (Таусон и др., 1983). Зависимость от стольких параметров затрудняет использование метациннабарита в качестве надежного геотермометра (Biagoni et al., 2017). Для метациннабарита, обнаруженного в отложениях реки Извёстка, определение условий формирования осложняется изоморфизмом в четырехкомпонентной системе Zn–Hg–Cd–S, для которой практически отсутствуют экспериментальные исследования и невозможно оценить влияние одновременного присутствия примесей Cd и Zn. Тем не менее набор минералов-включений в киновари, в первую очередь — метациннабарита и ртутистого сфалерита, указывает на то, что ртутная минерализация коренного источника россыпи реки Извёстка образовалась при температурах, повышенных относительно температур флюидов, формирующих классические объекты ртутной формации (Металлогения... 1976).

В литературе относительно часто встречаются упоминания Zn-содержащего метациннабарита (Груздев, 1975; Dini et al., 1995; Biagoni et al., 2017, Xiao Wang et al., 2023). Намного реже встречается Cd-содержащая его разновидность, для которой известно всего шесть местонахождений на Рудном Алтае, в Таджикистане и Киргизии (Васильев, 1966; Безуглый, 1975; Васильев, Гречищева, 1997; Гаськов и др., 2006). При этом метациннабарит, одновременно содержащий большое количество Zn и Cd, суммарно сопоставимое с содержанием Hg по количеству атомов, обнаружен только в рудах Мурзинского золотоносного месторождения на Алтае. Из шести известных местонахождений Zn-Cd-содержащего метациннабарита золоторудная минерализация выявлена только на этом объекте, остальные месторождения и рудопроявления являются собственно ртутными. Обнаруженный в ходе данного исследования Zn-Cd-содержащий метациннабарит наиболее близок к составу метациннабарита Мурзинского месторождения и является второй находкой этого минерала с таким большим одновременным содержанием Cd и Zn. Это месторождение относится к золото-медно-ртутной рудной формации, примеры которой известны и в пределах Тагильской островодужной зоны. К ним относятся месторождения Лялинское, Травяное и несколько других, располагающиеся вдоль Серовского-Маукского разлома близи городов Североуральск и Красноуральск, связанные с небольшими девонскими интрузивами верхнелобвинского габбро-диорит-гранодиоритового комплекса и залегающие в силурийских вулканогенных толщах (Мурзин, Сазонов, 1995). Сравнение ряда месторождений позволило установить в пределах комплекса вертикальную геохимическую зональность, проявленную в снижении количества киновари в рудах, увеличении примеси Cd и уменьшению примеси Hg в сульфидах от верхних частей рудно-метасоматической колонны к нижним. В рудах Травянского месторождения, относимого к средней части, отмечено присутствие сфалерита, содержащего примеси Cd (1.4—4.6 мас. %) и Hg (1.0—1.3 мас. %), для Лялинского месторождения, расположенного в верхней части рудно-метасоматической колонны, эти значения меняются на 0.2—0.3 мас. % Cd и 17.1—20.5 мас. % Hg (Огородников и др., 2001). Ассоциация редких сульфидов Zn, Cd, Hg и геологическая обстановка позволяют предположить, что источником киновари и, возможно, самородного золота в россыпи реки Извёстка послужил объект золото-медно-ртутной рудной формации. Особенности химического состава ртутистого сфалерита наиболее близки к выявленным в сфалерите Лялинского месторождения. Данный факт указывает на то, что предполагаемое оруденение может быть схоже с рудами Лялинского месторождения и формировалось в верхней части рудно-метасоматической колонны, а следовательно, должно сопровождаться кварцальбит-серицитовыми околорудными изменениями (Огородников и др., 2001).

Другим объектом для сравнения может послужить Воронцовское месторождение, которое является самым крупным в Тагильской зоне золоторудным объектом с широко проявленной ртутной минерализацией. Характерной чертой рудных парагенезисов Воронцовского месторождения является разнообразие ртутных и ртутьсодержащих

минералов, среди которых установлены: киноварь, метациннабарит с повышенным содержанием Zn (до 15.0 мас. %) и небольшой примесью Mn, сфалерит с примесью Hg (до 23.1 мас. %), Mn (до 5.2 мас. %) и Cd (до 1.3 мас. %) и другие минералы (Степанов и др., 2017; Kasatkin et al., 2022). Данная ассоциация минералов в значительной мере схожа с ассоциацией микровключений в киновари из отложений россыпи реки Извѣстка, в частности близко содержание Zn в метациннабарите и Cd и Hg в сфалерите. При этом Воронцовское месторождение отличается примесью Mn в минералах системы Zn–Hg–Cd–S, источником Mn в рудах, вероятно, являлись вмещающие вулканогенные породы (Викентьев и др., 2016). Важно отметить сходство геологического строения района Воронцовского месторождения и области питания россыпи реки Извѣстка. В обоих случаях наблюдается контакт известковых и вулканогенно-осадочных толщ девонского возраста, большая степень тектонической нарушенности, развитие вулканитов среднего состава. Близость минеральных парагенезисов ртутных и ртуть-содержащих минералов, установленных в россыпи реки Извѣстка и на Воронцовском золоторудном месторождении, в совокупности со схожей геологической позицией этих объектов может свидетельствовать о формировании россыпи реки Извѣстка за счет коренного объекта аналогичного Воронцовскому месторождению.

Еще одним редким минералом ассоциации включений в киновари отложений реки Извѣстка является Cd-содержащий метациннабарит, в котором содержание кадмия намного превышает содержание цинка. Максимальное содержание Cd в метациннабарите, установленное при изучении минерализации рудопоявления Уланду (Горный Алтай), составляло 15.80 мас. % (Васильев, 2011). В результате экспериментальных работ был синтезирован метациннабарит с большим содержанием Cd: 16.72, 18.22, 22.78 мас. % (Rittner, Schulman, 1943; Kremheller et al., 1960; Charbonnier, Murat, 1974). Столь значительная разница составов синтезированного и природного метациннабарита была объяснена несовпадением физико-химических условий проведения экспериментами с реальными условиями формирования руд. Найденный в киновари реки Извѣстка метациннабарит содержит Cd в концентрации до 19.45 мас. %, что является максимальным установленным значением на данный момент. Эти содержания довольно близки к полученным в результате синтеза минералов, что расширяет представления об условиях формирования ртутной минерализации и границах изоморфизма в природных системах Zn–Hg–Cd–S.

Коронарные структуры вокруг индивидов метациннабарита и участки, сложенные киноварью с рассеянными в ней включениями ртутистого сфалерита, имеют важное генетическое значение. Схожие структуры описаны на многих месторождениях мира (Груздев, 1975; Vostor et al., 1987; Dini et al., 1995). Существует различные точки зрения на природу подобных образований. Для агрегатов метациннабарита, киновари и ртутистого сфалерита месторождения Нью-Идрия был предложен механизм полиморфного превращения метациннабарита в агрегат практически чистой киновари и сфалерита в результате диффузии в твердой фазе (Vostor, 1976). Эта точка зрения подтверждается экспериментальной фазовой диаграммой системы Hg–Zn–S (Таусон и др., 1983). Альтернативное объяснение предполагает образование описанных структур в результате одновременного растворения кристаллизовавшегося метациннабарита и отложения смеси киновари и ртутистого сфалерита под действием растворов пониженной температуры (Xiao Wang et al., 2023). Присутствие двух морфологических разновидностей сфалерита и образование как кайм, так и крупных участков, полностью сложенных агрегатом киновари и Hg-содержащего сфалерита, позволяет предположить участие обоих процессов преобразования метациннабарита. Возможность сочетания двух описанных механизмов допускается и другими исследователями (Dini et al., 1995). В таком случае, для описанных ассоциаций и структур можно предположить следующие этапы формирования. В начале минералообразования из растворов повышенных температур кристаллизовался Zn–Cd-содержащий метациннабарит и киноварь–I (рис. 6, а).

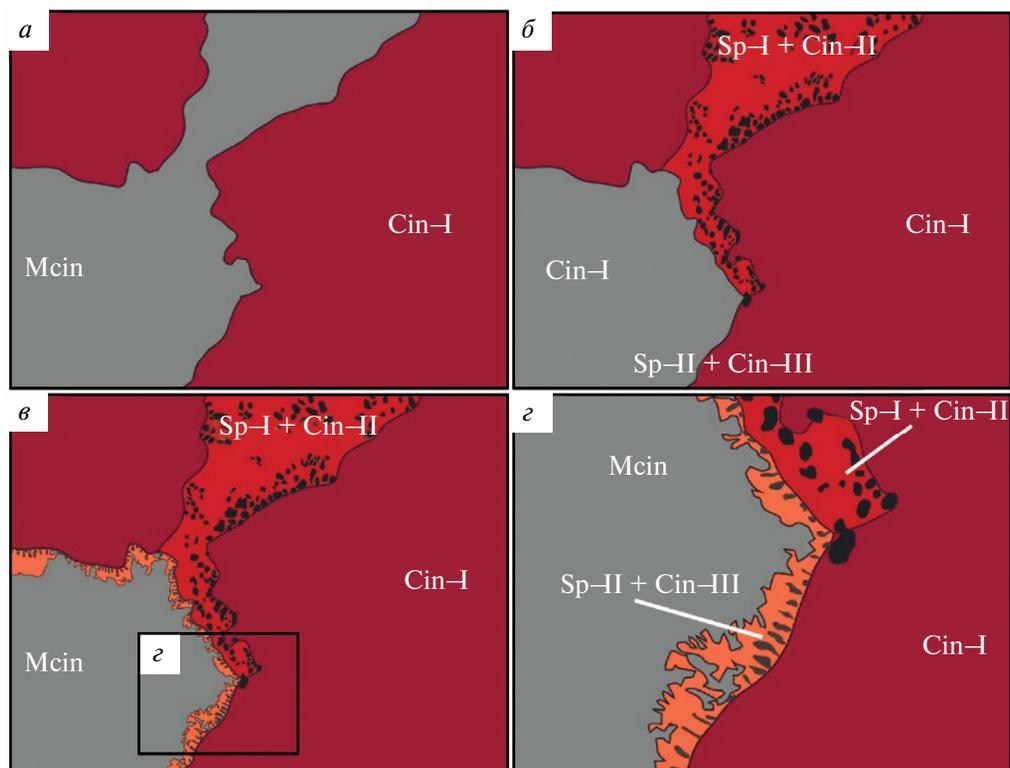


Рис. 6. Последовательность формирования структур внутреннего строения киновари из россыпи реки Извѣстка. Cin — киноварь, Mcin — метациннабарит, Sp — сфалерит, Py — пирит.

Fig. 6. Stages of the internal structure formation of cinnabar from Izvyostka River placer. Cin — cinnabar, Mcin — metacinnabar, Sp — sphalerite, Py — pyrite.

В дальнейшем, по мере остывания растворов, они при взаимодействии с метациннабаритом вызывали его замещение агрегатом киновари–II и ртутистого сфалерита–I, образовавших крупные участки (рис. 6, б). Позже в результате твердофазной диффузии на контактах сохранившегося метациннабарита с киноварью–I и киноварью–II происходило его полиморфное преобразование и формирование коронарных структур киновари–III и сфалерита–II, ориентированного внутрь метациннабарита перпендикулярно границам фаз (рис. 6, в, з). Метастабильное состояние метациннабарита, наблюдаемое в киновари из россыпи реки Извѣстка, может быть объяснено большим количеством изоморфных примесей, что наблюдается как в экспериментальных исследованиях (Ohmiya, 1974; Таусон, Абрамович 1980), так и в природных образцах (Xiao Wang et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальные минералогические исследования киновари из рыхлых отложений различных объектов Среднего Урала выявили различия ее типоморфных признаков. Киноварь россыпей рек Талая и Рефт, а также делювия Ёлкинского рудопроявления лишена информативных признаков, позволяющих определить связь коренной ртутной минерализации с благороднометалльным и другими типами оруденения.

Принципиальные отличия обнаружены в киновари россыпи реки Извѣстка. Крупный размер индивидов и высокая степень окатанности свидетельствуют о расположении коренного источника киновари на небольшом удалении.

Ассоциация редких минералов системы $Zn-Hg-Cd-S$ указывает на более высокие температуры гидротермальных процессов образования коренной минерализации, послужившей источником киновари в отложениях реки Извѣстка по сравнению с другими объектами. Особенности химического состава сульфидов Zn, Cd, Hg свидетельствуют о принадлежности потенциального коренного источника к золото-медно-ртутной формации. С учетом геологического строения района можно предположить нахождение вблизи россыпи реки Извѣстка коренного оруденения схожего с известными золоторудными объектами Тагильской вулканической зоны такими как Лялинское и Травянское кварцевожильные месторождения, либо Воронцовское золоторудное месторождение.

Метациннабарит, образующий включения в киновари реки Извѣстка, обладает уникальным химическим составом. Цинк-кадмиевая его разновидность сопоставима с метациннабаритом только одного объекта — Мурзинского золоторудного месторождения (Горный Алтай) и является второй находкой этого минерала в мире с одновременным высоким содержанием Zn и Cd . Впервые обнаружен Cd -содержащий метациннабарит с содержанием кадмия до 19.45 мас. %, который близок по составу синтезированным фазам (Hg, Cd)S.

Работа выполнена в рамках госзадания № 122040600006-1 «Структурно-вещественная эволюция полиметаморфических и магматических комплексов Южного Урала: петрология, геохимия, минералогия (FUUR-2022-0004)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Багатаев Р.М., Роговой В.М. Геологическое изучение и освоение Никитовских ртутных месторождений Донбасса. М.: Научный мир, **2011**. 182 с.

Безуглый М.М. Находка кадмий-цинксодержащего сульфида ртути на Памире // Доклады АН ТаджССР. **1975**. Т. XVIII. № 2. С. 51—52.

Борисенко А.С., Наумов Е.А., Оболенский А.А. Типы золото-ртутных месторождений и условия их образования // Геология и геофизика. **2006**. Т. 47. № 3. С. 342—354.

Васильев В.И. Новые данные о составе метациннабарита и ртутистого сфалерита с изоморфной примесью кадмия // Геология и геофизика. **2011**. Т. 52. № 7. С. 896—905.

Васильев В.И., Гречищева В.Н. Кадырѣльское ртутное рудопроявление в Туве: геологическое строение и минеральный состав руд // Геология и геофизика. **1997**. Т. 38. № 10. С. 1594—1603.

Викентьев И.В., Тюкова Е.В., Мурзин В.В., Викентьева О.В., Павлов Л.Г. Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, **2016**. 204 с.

Гаськов И.В., Акимцев В.А., Ковалев К.Р., Сотников В.И. Золотосодержащие минеральные ассоциации месторождений медно-рудного профиля Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. **2006**. Т. 47. № 9. С. 996—1004.

Грабежьев А.И., Смирнов В.Н. Артемовско-Алтынайский рудно-магматический ареал медно-порфирирового типа (Средний Урал): U-Pb SHRIMP-II возраст, петрогеохимия гранитоидов и генетическая специфика // Литосфера. **2012**. № 6. С. 78—89.

Груздев В.С. Изоморфизм цинка и ртути в природных сфалеритах и метациннабаритах // Доклады АН СССР. **1975**. Т. 225. № 3. С. 661—664.

Корнеев А.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С. Структурные предпосылки выявления золоторудной минерализации на Елкинском участке, Средний Урал / Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, **2022**. С. 108—112.

Кухаренко А.А. Минералогия россыпей. М.: Госгеолтехиздат, **1961**. 318 с.

- Металлогения ртути* / Ред. Смирнов В.И., Кузнецов В.А., Федорчук В.П. М.: Недра, **1976**. 255 с.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н.* Типоморфизм минеральных ассоциаций кварцевожильных золоторудных месторождений восточной части Тагильской зоны / Труды института геологии и геохимии им. Академика А.Н. Заварицкого. Выпуск 143. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, **1995**. С. 148–151.
- Никифоров Н.А.* Ртутно-сурьмяное оруденение Южного Тянь-Шаня: Условия размещения и вопросы методики прогнозирования. Фрунзе: Илим, **1969**. 239 с.
- Паламарчук Р.С.* Условия формирования россыпеобразующих систем, связанных с клинопироксенит-дунитовыми массивами Среднего Урала: Дис. ... канд. г.-м. н. СПб, **2023**. 110 с.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, **2010**. 280 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.* Месторождения золота Урала: Научное издание (второе, исправленное и дополненное). Екатеринбург: УГТГА, **2001**. 622 с.
- Степанов С.Ю., Шарпенюк Л.Н., Антонов А.В.* Флюидо-эксплозивные брекчии Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) // ЗРМО. **2017**. Т. 146. № 1. С. 29–43.
- Таусон В.Л., Абрамович М.Г.* Исследование системы ZnS–HgS гидротермальным методом // Геохимия. **1980**. № 6. С. 808–820.
- Таусон В.Л., Абрамович М.Г., Парадина Л.Ф.* Стехиометрия и факторы относительной устойчивости а- и б- модификаций сульфида ртути // Геохимия. **1983**. № 12. С. 1706–1719.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, **2001**. 571 с.

Morphological Features and Chemical Composition of Cinnabar and Metacinnabar from Placers of the Middle Urals and Their Possible Lode Sources

A. K. Kozin*, S. Yu. Stepanov, R. S. Palamarchuk, A. V. Korneev, V. S. Zhdanova

*South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Environmental Geology, Ural Branch
RAS, Miass, Russia*

**e-mail: kozin@mineralogy.ru*

The article presents data on the composition and internal structure of cinnabar from sediments of three gold-bearing placers and diluvium of a mercury occurrence in the Middle Urals. Differences in the size and degree of roundness of cinnabar have been established. Cinnabar from Izvyostka River differs from other studied objects in its large grain size (up to 2.5 mm) and high degree of roundness, which indicates the location of the lode source at a short distance. Significant differences were revealed in the set of mineral inclusions in cinnabar. Inclusions of quartz and calcite are widespread. The most contrasting relative to other objects is the association of inclusions in the cinnabar from Izvyostka River. It is distinguished by the wide distribution of rare minerals of the Zn–Hg–Cd–S system, including Cd-rich metacinnabar, Zn–Cd-rich metacinnabar, and Hg-rich sphalerite. Cd-rich metacinnabar with a cadmium content of up to 19.45 wt.% was discovered for the first time. This mineral is close in composition to the synthesized phases (Hg, Cd)S. The totality of data on the inner structure and composition of cinnabar does not allow us to assume the type of the lode sources of most placers. However, typomorphic characteristics and especially the inclusion of rare sulfides Hg, Cd and Zn in cinnabar from sediments of the Izvyostka River indicates the location of a primary source with gold-mercury mineralization near the placer, similar to the Vorontsovskoe gold deposit.

Keywords: placers, cinnabar, metacinnabar, Hg-rich sphalerite, Zn–Hg–Cd–S system, gold, lode sources

REFERENCES

- Bagataev R.M., Rogovoi V.M.* Geological study and development of Nikitov mercury deposit in Donbass. Moscow: Nauchnyi mir, **2011**. 182 p. (*in Russian*).
- Bezuglyi M.M.* The finding of Cd-Zn-bearing mercury sulfide in the Pamirs. *Dokl. Akad. Nauk Tadzhikskoi SSR*. **1975**. Vol. XVIII. N 2. P. 51–52. (*in Russian*).
- Biagioni C., Silvia M., Pasero M.* New data on metacinnabar from Tuscany (Italy). New data on metacinnabar from Tuscany (Italy). *Atti della Soc. Toscana di Sci. Nat.* **2017**. Vol. 124. P. 13–18.
- Boctor N.Z.* The Mercury-Selenium-Sulfur System and Its Geological Implications. Part 1: Phase Relations in the Mercury-Selenium-Sulfur System. Part 2: The Sulfoselenides and Sulfides of Mercury: Mineralogy and Geochemistry. *Ph. D. thesis syn.* West Lafayette: Purdue University, **1976**.
- Boctor N.Z., Shieh Y.N., Kullerud G.* Mercury ores from the New Idria Mining District, California: geochemical and stable isotope studies. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1987**. Vol. 51. N 6. P. 1705–1715.
- Borisenko A.S., Naumov E.A., Obolensky A.A.* Types of gold-mercury deposits and their formation conditions. *Russian Geol. Geophys.* **2006**. Vol. 47. N 3. P. 342–354.
- Charbonnier N., Murat M.* Sur la détermination des diagrammes de phases a temperature ambiante des sulfures mixtes appartenant aux systemes Zn–Cd–S, Zn–Hg–S, Cd–Hg–S. *Compt. Rend. Akad. Sc. Paris*. **1974**. Vol. 278. N 4. P. 259–261.
- Dini A., Benvenuti M., Lattanzi P., Tanelli G.* Mineral assemblages in the Hg-Zn-(Fe)-S system at Levigliani, Tuscany, Italy. *Eur. J. Miner.* **1995**. Vol. 7. N 2. P. 417–428.
- Gas'kov I.V., Akimtsev V.A., Kovalev K.R., Sotnikov V.I.* Gold-bearing mineral assemblages of Cu-ore deposits in the Altai-Sayan folded area. *Russian Geol. Geophys.* **2006**. Vol. 47. N 9. P. 996–1004.
- Grabezhev A.I., Smirnov V.N.* Artyomovsk-Altynai ore-magmatic porphyry-copper areal (the Middle Urals): U-Pb SHRIMP-II age, petrogeochemistry of granitoids and genetic peculiarity. *Litosfera*. **2012**. N 6. P. 78–89 (*in Russian*).
- Gruzdev V.S.* Zinc and mercury isomorphism in natural sphalerites and metacinnabars. **1975**. Vol. 225. N 3. P. 661–664 (*in Russian*).
- Kasatkin A.V., Stepanov S. Yu., Tsyganko M.V., Škoda R., Nestola F., Plášil J., Makovicky E., Agakhonov A.A., Palamarchuk R.S.* Mineralogy of the Vorontsovskoe gold deposit (Northern Urals). *Mineralogy*. **2022**. Vol. 8. N 1. P. 5–93.
- Korneev A.V., Stepanov S. Yu., Palamarchuk R.S.* Structural features for identification of gold mineralization at the Elkinsky area, Central Urals. In: *Metallogeny of ancient and modern oceans-2022. From composition to models and prediction of deposits*. Miass: SU FRC MG UB RAS, **2022**. P. 108–112 (*in Russian*).
- Kremheller A., Levine A.K., Gashurov G.* Hydrothermal preparation of two-component solid solutions from II–VI compounds. *J. Electrochem. Soc.* **1960**. Vol. 107. N 1. P. 12–15.
- Kukhareno A.A.* Mineralogy of placers. Moscow: Gosgeoltekhizdat, **1961**. 318 p. (*in Russian*).
- Metallogeny of mercury*. Ed. by Smirnov V.I., Kuznetsov V.A., Fedorchuk V.P. Moscow: Nedra, **1976**. 255 p. (*in Russian*).
- Murzin V.V., Sazonov V.N.* Typomorphism of mineral associations of quartz vein gold deposits in the eastern part of the Tagil zone. In: *Proc. Inst. Geol. Geochem. UB RAS*. Vol. 143. Ekaterinburg: IGG UB RAS, **1995**. P. 148–151 (*in Russian*).
- Nikiforov N.A.* The Hg–Sb Mineralization of the South Tien Shan: Distribution and Methods of Prediction. Frunze: Ilim, **1969**. 239 p. (*in Russian*).
- Ohmiya T.* Thermal expansion and the phase transformation in mercury sulphide. *J. Appl. Crystallogr.* **1974**. Vol. 7. N 3. P. 396–397.
- Palamarchuk R.S.* Conditions of formation of placer-forming systems associated with clinopyroxenite-dunite massifs of the Middle Urals. *Ph. D. thesis*. Saint Petersburg: Saint Petersburg mining university, **2023**. 110 p. (*in Russian*).
- Palero-Fernández F.J., Martín-Izard A., Prieto M.Z., Mansilla-Plaza L.* Geological context and plumbotectonic evolution of the giant Almadén Mercury Deposit. *Ore Geol. Rev.* **2015**. Vol. 64. P. 71–88.
- Potter R.W., Barnes H.L.* Phase relations in the binary Hg–S. *Amer. Miner.* **1978**. Vol. 63. N 11–12. P. 1143–1152.
- Puchkov V.N.* Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa: DesignPoligraphService, **2010**. 280 p. (*in Russian*).

Rittner E.S., Schulman J.H. Studies on the coprecipitation of cadmium and mercuric sulfides. *J. Phys. Chem.* **1943**. Vol. 47. N 8. P. 537—543.

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. Deposits of gold in the Urals. Ekaterinburg: UGGA, **2001**. 622 p. (in Russian).

Sharma R.C., Chang Y.J.L., Guminski C. The Hg-S (mercury-sulfur) system. *J. Phase Equilib.* **1993**. Vol. 14. P. 100—109.

Stepanov S. Yu., Sharpenok L.N., Antonov A.V. Fluid-explosive breccias of the Vorontsovskoe gold deposit (the North Urals). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 146. N 1. P. 1—17. (in Russian).

Tauson V.L., Abramovich M.G. Hydrothermal study of the ZnS-HgS system. *Geochem. Int.* **1980**. N 17. P. 117—128.

Tauson V.L., Abramovich M.G., Paradina L.F. Stoichiometry and relative stability of the a and b modification of mercury sulfide. *Geochem. Int.*, **1984**. N 21. P. 1—13.

Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). Ed. by Parfenov L.M., Kuzmin M.I. Moscow: MAIK “Nauka-Interperiodica”, **2001**. 571 p. (in Russian).

Vasil'ev V.I. New data on the composition of metacinnabar and Hg-sphalerite with an isomorphous Cd admixture. *Russian Geol. Geophys.* **2011**. Vol. 52. N 7. P. 701—708.

Vasil'ev V.I., Grechishcheva V.N. Kadyrel mercury occurrence in Tuva: geological structure and mineral composition. *Geol. Geophys.* **1997**. Vol. 38. N 10. P. 1594—1603 (in Russian).

Vikentyev I.V., Tyukova E.E., Murzin V.V., Vikent'eva O.V., Pavlov L.G. Vorontsovsk gold deposit. Geology, gold modes, genesis. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset, **2016**. 204 p. (in Russian).

Wang X., Liu J., Carranza E.J.M., Zhai D., Zhao Q., Weng G., Zhang B. Characteristics and formation conditions of Se-bearing metacinnabar in the Wanshan mercury ore field, Eastern Guizhou. *Minerals*. **2023**. Vol. 13. N 2. Paper 173.

Youngson J.H., Wopereis P., Kerr L.C., CrawD. Au-Ag-Hg and Au-Ag alloys in Nokomai and Nevis valley placers, northern Southland and Central Otago, New Zealand, and their implications for placer-source relationships. *N.Z.J. Geol. Geophys.* **2002**. Vol. 45. N 1. P. 53—69.