

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411

РУДОГЕНЕЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ОЛИМПИАДА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ, РОССИЯ)



А.М. Сазонов¹, Е.А. Звягина¹, С.А. Сильянов¹, К.В. Лобанов¹, С.И. Леонтьев¹,
Ю.А. Калинин², А.А. Савичев^{3,4}, П.А. Тишин⁵

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «Норильскгеология», Санкт-Петербург, Россия

⁵ Томский государственный университет, Томск, Россия

Золото-сульфидное месторождение Олимпиада в Енисейском кряже по результатам доразведки последних лет подтвердило свою уникальность по запасам (1560 т) и протяженности руд на глубину (более 1500 м). Причем признаков выклинивания и изменения параметров оруденения на глубину не отмечено. В верхней части месторождения, до глубины 400 м, были развиты окисленные руды, которые к настоящему времени отработаны. Из них добыто около 200 т металла. Месторождение приурочено к силикатно-карбонатной пачке терригенной толщи кординской свиты нижнего риффея. В окружении месторождения распространены гранитоиды, удаленные от него на 1,5 и более км. Внедрение интрузий в Татарско-Ишимбинской тектонической зоне способствовало формированию компенсационных синформных депрессий (Иннокентьевская и Чиримбинская синклинали) в приконтактных областях интрузий, объединенных антиформным блоком пород (Медвежинская антиклиналь). Эти сопряженные структурные элементы, имеющие W-образный вид, представляют структуру рудного поля. Субгоризонтальные подвижки в регионе придали собственно магматогенной структуре вид сопряженных синклинали-антиклинальных складок тектонического сжатия. Рудные тела концентрируются в замках складок и перегибах пород на крыльях. Наиболее богат рудной массой северо-восточный замок Медвежинской антиклинали, где рудные залежи северного и юго-восточного крыльев Медвежинской антиформы соприкасаются и представляют единое рудное тело, склоняющееся на юго-восток. Слюдяно-кварц-карбонатная матрица сульфидно-вкрапленных руд разлинзована, милонитизирована и собрана в мелкие складки вплоть до плейчатости. Главные рудообразующие элементы – Au, Ag, Fe и Sb – образуют вкрапленность самородных минералов, сульфидов, сульфосолей и теллуридов. По минералого-геохимическому составу руды делятся на золото-мышьяковые и золото-мышьяк-сурьмяные, которые пространственно разобщены. Золото-мышьяк-сурьмяные руды с геохимической примесью ртути и теллура приурочены к северо-восточной залежи рудного тела. Метаморфизм в тектонометаморфической зоне месторождения проходил при температуре 400–420°C и давлении 3–4 кбар в зонах хлорита и биотита, а в зоне граната и маргарита – при 580–605°C и давлении 7,2–7,5 кбар. Метасоматоз силикатно-карбонатных пород с образованием скарноидов (Акт+КЦо+Гр+Сф) осуществлялся при 320–480°C и давлении 1,3–1,5 кбар, а кислотных метасоматитов (окварцованных и серицитизированных пород) – при $T = 290\text{--}380^\circ\text{C}$ и $P = 1,0\text{--}3,0$ кбар. Полистадийный гидротермальный кварцево-золото-сульфидный процесс формирования агрегатов осуществлялся в интервале 460–110°C. Возраст главных стадий рудообразования лежит в интервале 817–660 млн лет. Промышленные руды золото-мышьякового состава имеют возраст 758–803 млн лет, а золото-мышьяк-сурьмяные – 660–795 млн лет. Изотопно-геохимические исследования свидетельствуют об участии в образовании месторождения корового и мантийного вещества. В транспортировке рудного вещества принимали участие водно-хлоридно-углекислые растворы, насыщенные углеводородами.

Ключевые слова: Енисейский кряж, месторождение золота Олимпиада, вмещающие породы, структура, состав руд, генезис.

Общие сведения о месторождении

Месторождение Олимпиада открытое в 1974 г., одно из крупнейших в России. Эксплуатация богатых окисленных руд карьером началась в 1985 г. В первые годы производство золота из окисленных руд составляло 230 (1986 г.) – 520 кг (1987 г.), которое выросло до 50 т (2017 г.) из коренных руд благодаря созданию современного горно-обогательного комбината собственником месторождения компанией «Полюс». В настоящее время глубина

эксплуатационного карьера около 500 м, проектная глубина карьерной отработки – 650 м. Добыто руды около 105 млн т; произведено металла ~ 580 т, в том числе из окисленных руд ~ 200 т (при $X_{\text{Cr,Au}} = 11,1$ г/т). Общие запасы золота на 01.01.2018 – 1560 т ($X_{\text{Cr,Au}} = 4\text{--}4,6$ г/т). Рудные подсечения зафиксированы на горизонте –850 м, протяженность рудного тела на глубину 1,5 км, без признаков выклинивания. Выявленные запасы золота обеспечивают работу Олимпиадинского ГОКа еще на 25 лет без снижения уровня производства металла. С горизонта –50 м

предусматривается подземная отработка по борту 3 г/т. Добывающая компания планирует в ближайшее время попутное извлечение сурьмы с годовой производительностью около 15% от общероссийского.

Различным вопросам геологии месторождения посвящены многочисленные работы [Звягина, 1989; Новожилов и др., 1986; Сазонов, 1998; Ли, 2003; Савичев, Гавриленко, 2003; Савичев и др., 2006; Сазонов и др., 2010; Совмен и др., 2009; Новожилов и др., 2014]. Данная статья основана на многолетних авторских исследованиях геологии месторождений региона, в том числе и месторождения Олимпиада. Большая часть фактического и аналитического материала, использованного при написании статьи, получена авторами в результате доразведки глубоких горизонтов месторождения (2008–2017 гг.).

Результаты и обсуждение исследований

Геологическое положение месторождения. Месторождение Олимпиада расположено практически в центре Северо-Енисейского рудного района, от месторождения Советского на севере до месторождения Ведуга на юге (рис. 1). Рудный район является наиболее продуктивным в восточном золотоносном поясе Енисейского кряжа. Стратифицированные отложения рудного района представлены тейской серией нижнего протерозоя и сухопитской серией рифея [Легенда... 2002; Стороженко и др., 2002].

Коренные золотоносные объекты расположены в поле развития нижней части сухопитской серии (кординская, горбилоская и удерейская свиты). Наиболее продуктивной по локализации месторождений является кординская свита, в пределах которой локализованы месторождения Благодатное, Титимухта, Олимпиада, Панимба, в которых сосредоточено более 95% учтенных запасов коренного золота рудного района. В составе свиты выделяются следующие осадочно-метаморфические подразделения (снизу вверх):

1. Полимиктовые метагравелиты, слюдяные кварциты – до 20 м.
2. Кварцитовидные биотитовые и двуслюдяные сланцы – 380–500 м.
3. Двуслюдяные кварц-карбонатные сланцы, линзы мраморов (до 40 м) – 120–140 м.
4. Углеродистые двуслюдяные, иногда с хлоритом и гранатом сланцы – 80–140 м.
5. Гранат-ставролитовые (иногда с андалузитом) двуслюдяные сланцы – ~500 м.
6. Кварцитовидные двуслюдяные сланцы. Кварциты полевошпатовые – 200–220 м.

Главными рудовмещающими горизонтами являются двуслюдяные кварц-карбонатные (месторождение Олимпиада) и гранат-ставролитовые двуслюдяные сланцы (месторождение Благодатное) кор-

динской свиты. Месторождения Перевальнинского рудного поля (Эльдорадо, Первенец, Ударный, Ольгинское) локализованы в сланцевой толще горбилоской свиты. Общие запасы в настоящее время еще неопределенны, но, по предварительной оценке, они составляют около 100 т. В советский период основная коренная золотодобыча в районе проводилась на месторождении Советском. Вмещающая толща месторождения представлена углеродистыми филлитами удерейской свиты. За время эксплуатации месторождения Советского с 1906 по 2013 г. добыто золота около 120 т. В 90-х гг. прошлого века в южной части рудного района в поле развития удерейской свиты открыто месторождение Ведуга золото-сульфидного типа с запасами около 100 т. В пределах развития отложений погорюйской и аладинской свит сухопитской серии и вышележащих толщ тунгусикской серии промышленно значимых золоторудных проявлений не установлено.

Магматизм в золотоносном поясе представлен от ультраосновных до кислых, включая щелочные их разновидности. Преобладающим развитием пользуются гранитоиды. В настоящее время среди интрузий гранитоидного состава выделено шесть комплексов, сформировавшихся в интервале 455–880 млн лет (рис. 1, В, С). Оценка пространственной связи золоторудения свидетельствует о дву-modalном распределении удаленности золоторудных объектов от массивов гранитов. Наиболее продуктивные (уникальные) золоторудные объекты (Олимпиада, Благодатное) концентрируются на удалении от интрузий 1,5–5 км, а крупные, средние (Эльдорадо, Ведуга, Советское) и мелкие по запасам месторождения – на удалении 11,5–17 км [Сазонов и др., 2010].

В структурном плане золотоносный пояс региона приурочен к крыльям Панимбинского антиклинория, в зоне влияния Татарского и Ишимбинского региональных разломов (рис. 1, В). Повышенная концентрация золоторудных очагов приурочена к гранито-сланцевым куполам, осложняющим осевую зону антиклинория [Сараев, Сазонов, 1978]. Примечательно то, что месторождения золото-сульфидного типа (Олимпиадинское, Благодатное, Ведуга, Панимба) располагаются в складчатой толще сухопитской серии на юго-западном крыле антиклинория в тектоническом блоке между Татарским и Ишимбинским разломами. Месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации (Эльдорадо, Советское) и другие более мелкие золоторудные объекты приурочены к северо-восточному крылу антиклинория на внешнем фланге Ишимбинского разлома, в поле развития горбилоской и удерейской свит [Сазонов и др., 2010]. Территория северо-восточного блока золотоносного пояса характеризуется богатейшими россыпями золота, отработанными в большей мере в XIX–XX столетиях (рис. 1, С).

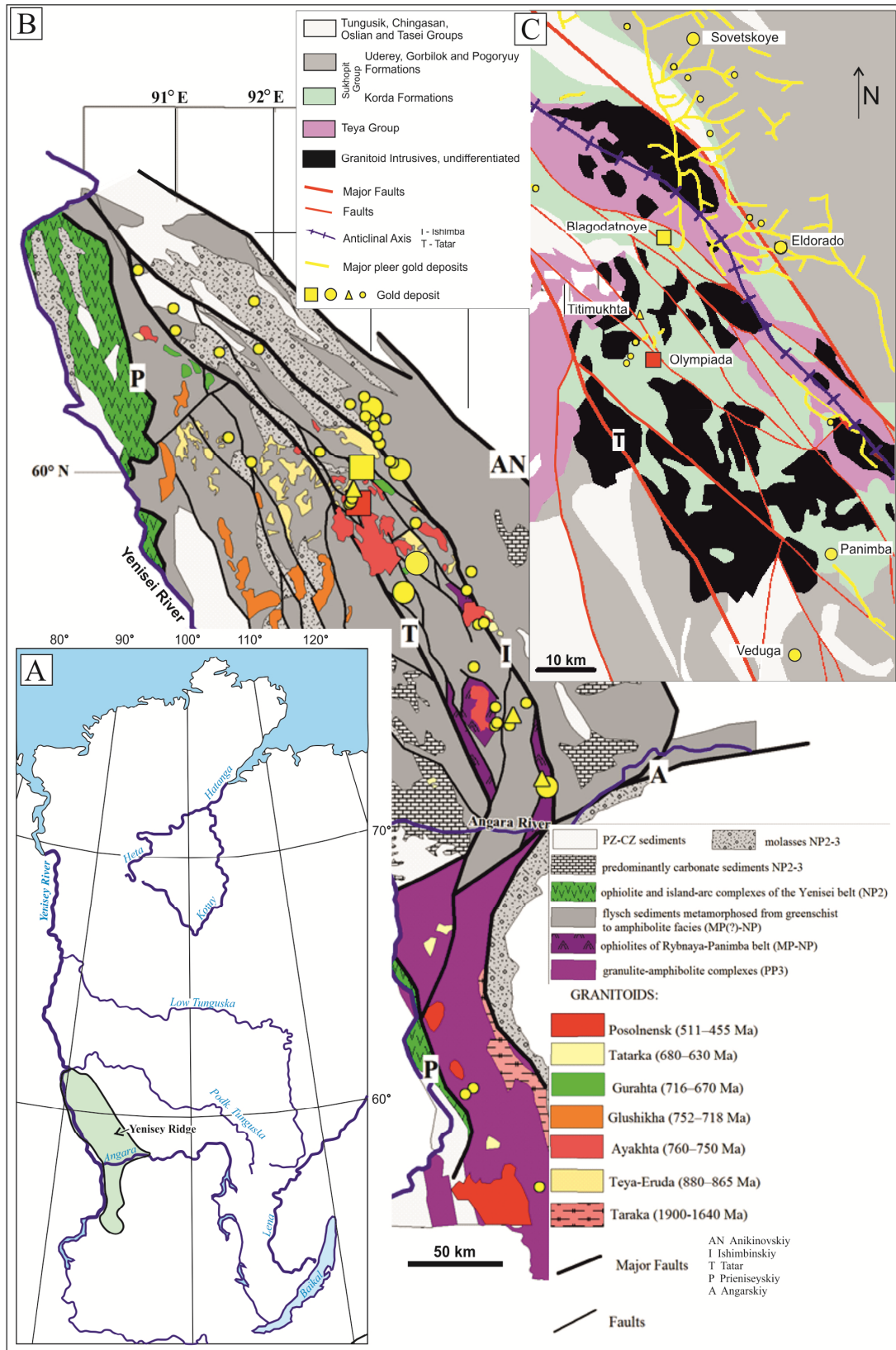


Рис. 1. Положение месторождений золота Енисейского кряжа в региональных структурах
 А – географическое положение месторождения; В – схематическая геологическая карта Енисейского кряжа [Верниковский, Верниковская, 2006; Likhanov et al., 2013]; С – схема геологического строения Северо-Енисейского рудного района

Fig. 1. Position of gold deposits of Yenisei Ridge in regional structures
 А – Geographic position of deposit; В – Schematic geological map of Yenisei Ridge [Vernikovskiy, Vernikovskaya, 2006; Likhanov et al., 2013]; С – Layout of geological structure of Severo-Yeniseiskiy ore district

До настоящего времени на разных участках техногенных месторождений ведется старательская золотодобыча. В месторождениях Олимпиада и Ведуга кроме собственно золотосодержащих руд развиты золото-сурьмяные руды.

Геологическое строение месторождения

Олимпиадинское рудное поле располагается в пределах близ-изометричного структурного блока, ограниченного с СВ и ЮЗ крупными разломами СЗ

простираения, входящими в систему Татарского глубинного разлома и относящимися к крутопадающим сбросо-сдвигам. С Ю-ЮВ и СЗ рудное поле зажато между Чиримбинским и Тырадинским гранитными массивами (рис. 2). Предполагалось, что рудное поле локализовано над провесом кровли крупного батолита, поверхностным выражением которого являются упомянутые массивы и их спутники [Ли, 2003; Сердюк и др., 2010]. Геолого-разведочными работами 2008–2018 гг. гранитоиды, предполагаемые геофизиками на глубине 1 км, на глубине 2 км не установлены.

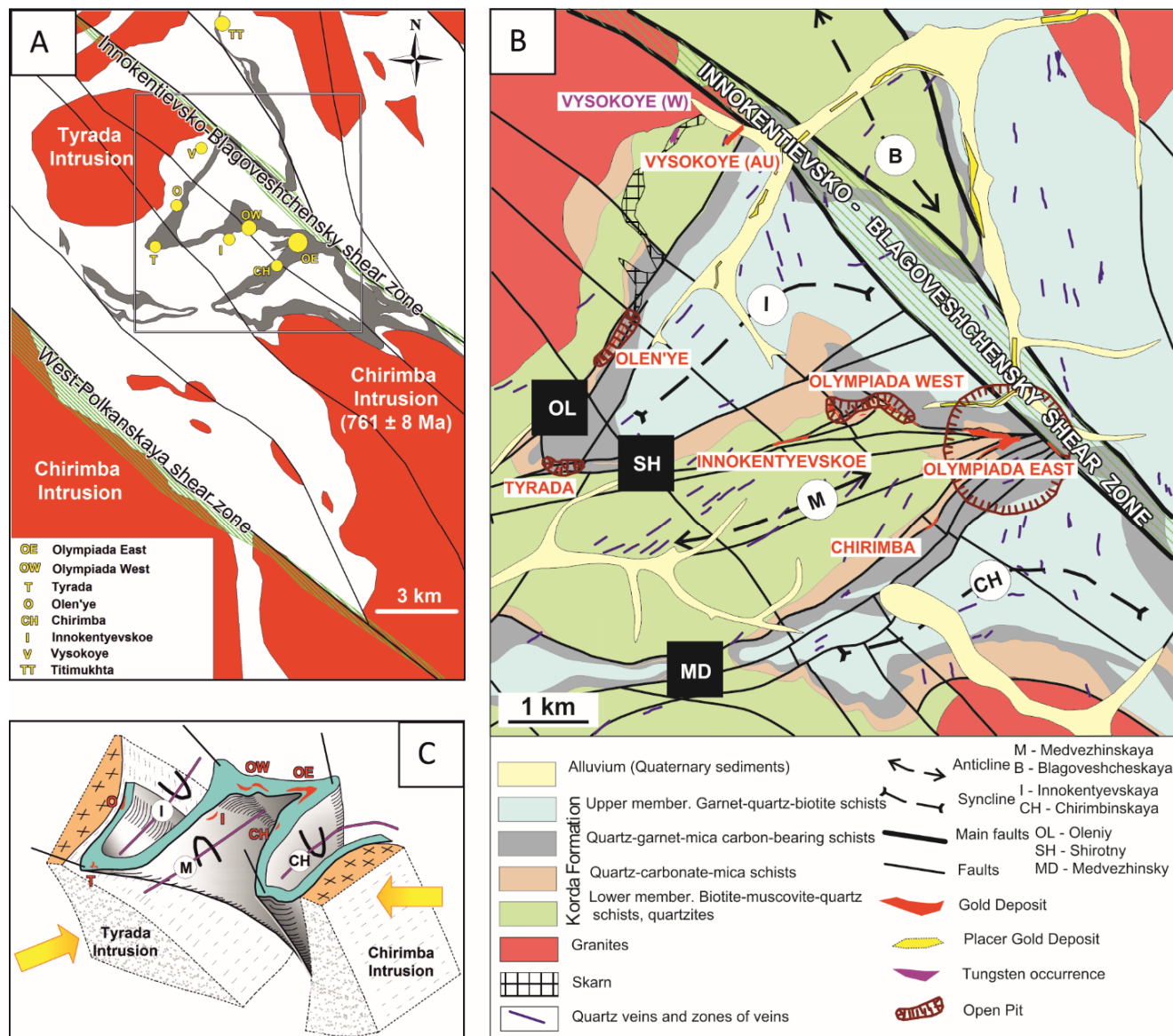


Рис. 2. Олимпиадинское рудное поле

А – положение месторождений относительно рудовмещающей пачки (серый цвет), интрузивных массивов и основных разрывных нарушений Татарской зоны разломов; В – схематическая геологическая карта Олимпиадинского рудного поля; С – модель формирования складчатой структуры в результате динамического воздействия гранитоидных интрузий [Журавлев, 2016]

Fig. 2. Olimpiada ore field

A – position of deposits in relation to ore hosting band (gray color), intrusive massifs and main faults of Tatar fault zone; B – Schematic geological map of Olimpiada ore field; C – model of formation of folded structure as the result of dynamic impact of granitoid intrusions [Zhuravlev, 2016]

Направленность развития морфоструктур. Структура Олимпиадинского рудного поля определяется тремя сопряженными складками: Иннокентьевской и Чиримбинской синклиналими и расположенной между ними Медвежинской антиклиналью (см. рис. 2, В). Они имеют протяженность 4–5 км и размах крыльев 1–2 км. Осевые поверхности этих складок ориентированы в ВСВ направлении, их шарниры погружаются на ВЮВ под углами от 25–30° до 50–80° [Ли, 2003; Журавлев, 2016]. В совокупности эти три складки образуют незамкнутую структуру W-образной формы (рис. 2). Косое (60°) положение их шарниров к СЗ простиранию региональных разломов дает основание предполагать их образование в связи с меняющимися смещениями по крупным СЗ разломам [Ли, 2003]. По нашему мнению, Иннокентьевская и Чиримбинская синклинали являются компенсационными структурами проседания в связи с внедрением гранитоидов, а Медвежинская антиклиналь – граничным выступом между компенсационными депрессиями. Поздние субгоризонтальные перемещения по разнонаправленным дизъюнктивам придали структуре вид типичных сопряженных складок сжатия.

В районе Олимпиадинского месторождения известны месторождения рудного и россыпного золота, а также железа, полиметаллов, вольфрама и лития [Сердюк и др., 2010]. Однако, главной особенностью этого района, помимо уникальной золотой продуктивности, является наличие в его пределах

золото-сульфидного оруденения Au-Sb, Au-W и Au-Sb-W геохимического типов, а также Au-Bi оруденения (месторождение Титимухта), что отличает его от других золоторудных районов Енисейского края, в которых типовым является оруденение золото-кварцевого типа. Золото-сульфидный тип оруденения, помимо собственно Олимпиадинского месторождения, представлен Тырадинским, Оленьим и Высоким (Au) месторождениями, а также Иннокентьевским и Чиримбинским проявлениями, которые в совокупности образуют Олимпиадинское рудное поле (табл. 1).

Характеристика вмещающих пород и руд

В разделе представлены авторские материалы исследования, которые дополняют и уточняют ранее полученные результаты [Новожилов и др., 1986; Звягина, 1989; Ли, 2003].

Петрография стратифицированных пород и руд. Вмещающие породы на месторождениях представлены метаморфизованными стратифицированными отложениями кординской свиты (сверху вниз): углеродистые кварц-слюдистые сланцы, сланцеватые мраморы, двуслюдяные кварц-кальцитовые и кварц-гранат-двуслюдяные сланцы (рис. 3).

Химический состав пород изменяется практически непрерывно от собственно глиноземистых (А) до карбонатных (С), в узком интервале ферромагнезиальности (FM) (см. рис. 4).

Краткая характеристика золоторудных объектов Олимпиадинского рудного поля

Таблица 1

Table 1

Brief characteristics of gold-ore projects of Olimpiada ore field

Рудные объекты	Содержание золота в руде, г/т	Запасы золота, т	Вмещающие породы	Минеральный состав руд	
				Главные	Второстепенные
Золото-сульфидно-вкрапленные (Au-As-Sb)					
Олимпиада	4,4	1564	Силикатно-карбонатные, углеродистые сланцы; скарноиды, джаспероиды	Пирротин, арсениопирит, стибнит, бертьерит, золото самородное	Пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, сульфиды Co-Ni, самородная сурьма, ауристит, теллуриды Bi, Hg, Pb, шеелит, вольфрамит
Чиримбинское	4,4	0,4			
Инокентьевское	3,1	1,2			
Тырада	5,8	12,1			
Высокое	4,6	9,3			
Золото-скарновое (Au-W-As)					
Оленье	6,5	8,7	Силикатно-карбонатные, углеродистые сланцы; скарноиды, окварцевание в карбонатных толщах	Пирротин, арсениопирит, золото, шеелит	Пирит, стибнит, бертьерит, сульфиды полиметаллов, висмутин, теллуриды Bi
Штокверковое (Au-Bi-кварцевое)					
Титимухта	3,0	76,7	Ороговикованные двуслюдяные сланцы, окварцевание хлоритизация турмалинизация	Пирротин, пирит, висмутин, самородные висмут и золото	Хедлейит и другие теллуриды Bi, сульфиды полиметаллов, арсениопирит, молибденит, пенгландит

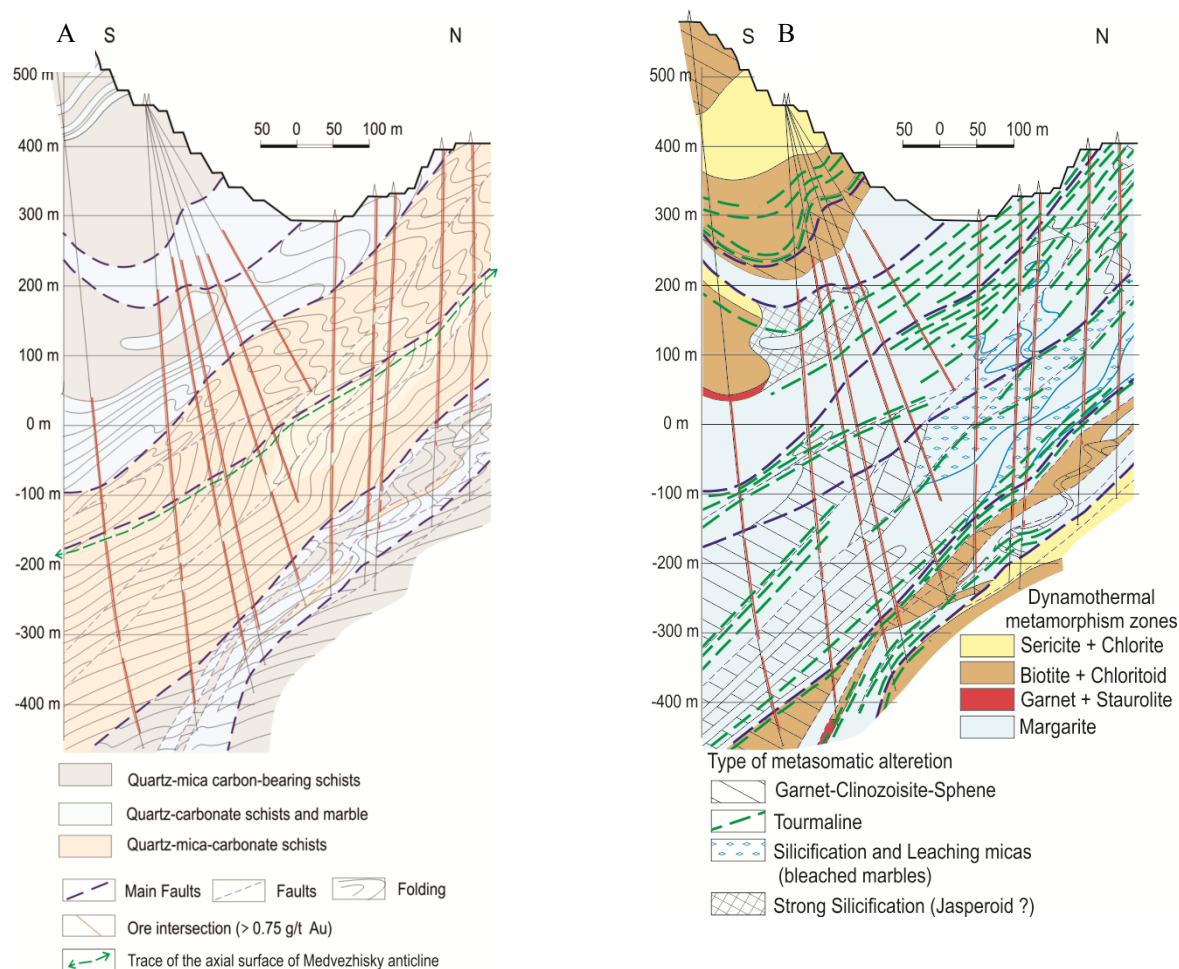


Рис. 3. Геологический разрез по РЛ-25.5

А – Литолого-структурное строение; В – схема метаморфической и гидротермальной зональности

Fig. 3. Geological section along exploration line 25.5

A – Lithological and structural settings; B – metamorphic and hydrothermal zoning layout

Породы в разной степени милонитизированы, гидротермально изменены и содержат сульфидную минерализацию. Среди них рудовмещающими являются кварц-слюдяно-карбонатные (двуслюдяные кварц-кальцитовые) сланцы и существенно карбонатные породы (мраморы). В подстилающих кварц-двуслюдяных (кварц-гранат-двуслюдяных) и перекрывающих кварц-слюдяно-углеродистых (углеродистых силикатных) сланцах оруденение отмечается только вблизи их контакта с карбонатсодержащими и карбонатными породами.

Углеродистые силикатные (углеродистые кварц-серицитовые и углеродистые биотит-хлоритоидные) сланцы имеют черный цвет, линзовидную сланцеватость и представляют собой бластомилониты (см. рис. 5, а-с). Обломочные фрагменты породы размером первые миллиметры, округлой формы, пигментированные пылеватым графитом, закатываются по поверхностям кливажа. Они состоят из серицитомусковита (20–50%), кварца (25–40%), графита (5–

10%) и хлоритоида (5–25%). В качестве примеси (до 10%) постоянно присутствуют турмалин, ильменит, рутил, пирит и пирротин. В единичных случаях отмечены ставролит, гранат, биотит, плагиоклаз и кальцит.

В участках переслаивания углеродистых пород с кварцсодержащими мраморами развиты клиноцоизитовые углеродистые метасоматиты (скарноиды), при этом клиноцоизит занимает от 10 до 30% от объема породы. Его размеры достигают 0,5 мм по удлинению, и он приобретает промежуточное положение между минералами основной ткани и порфиробластами.

Углеродистые двуслюдяные хлоритоидные бластомилониты вблизи разломов часто интенсивно окварцованы, импрегнированы золотосодержащей арсенопиритовой и сурьмяной минерализацией. Золото-сульфидная минерализация сопровождается рекристаллизацией кварца и очень незначительной хлоритизацией биотита.

Сланцеватые мраморы – серые, синевато-серые породы с широкой и средней полосчатостью, проявляю-

щейся по интенсивности окраски (см. рис. 5, *d-f*). Структура пород равномерно-мелкозернистая (0,2 × 0,07 мм). В их составе существенно преобладает кальцит. Кварц, мусковит, хлорит, маргарит и пылеватый графит занимает не более 5–10%. Постоянно присутствуют пирротин и в меньшем количестве пирит. В рудных интервалах наряду с сульфидизацией увеличивается содержание гранобластического кварца до 15–30%, который образует линзы с примесью слюд. Сульфидная минерализация развита в виде весьма тонкозернистой вкрапленности и гнездово-прожилковых образований. Наиболее крупные зерна сульфидов, как правило, не превышают десятых долей миллиметра.

Двуслюдяные кварц-кальцитовые сланцы имеют светло-серо-зеленую окраску, иногда с коричневатым оттенком. Породы обладают тонкой (0,5–2 см), средней (5–10 см) и широкой (50–80 см) полосчатостью (рис. 5, *g-i*). Сланцеватость средняя и слабовыраженная. Минеральный состав: кальцит (15–40%), кварц

(10–40%), плагиоклаз (5–20%), мусковит (5–25%), биотит (5–35%), маргарит (до 1%), турмалин (1–3%), рутил (3–5%), сульфиды (3–10%). Особенности строения пород являются линзовидно-пятнистое распределение минералов и псевдоморфные структуры. Выделение рудной минерализации сопровождается укрупнением зерен кальцита, кварца, повышением концентраций рутила крупных разностей.

Близко по времени (возможно, на заключительных стадиях метаморфизма) проявился кальциевый метасоматоз скарнового типа с кристаллизацией граната, клиноцоизита, титанита, альбита, калишпата. Более позднее (внутрирудное) окварцевание привело к нарушению структуры минерального сообщества, растворению и частичному переотложению клиноцоизита, титанита и граната, кристаллизации лабрадор-анортита, перекристаллизации кварца (с привнесом незначительного количества SiO₂), кальцита, появлению доломита и образованию кальцит-серичитовых псевдоморфоз по андезину.

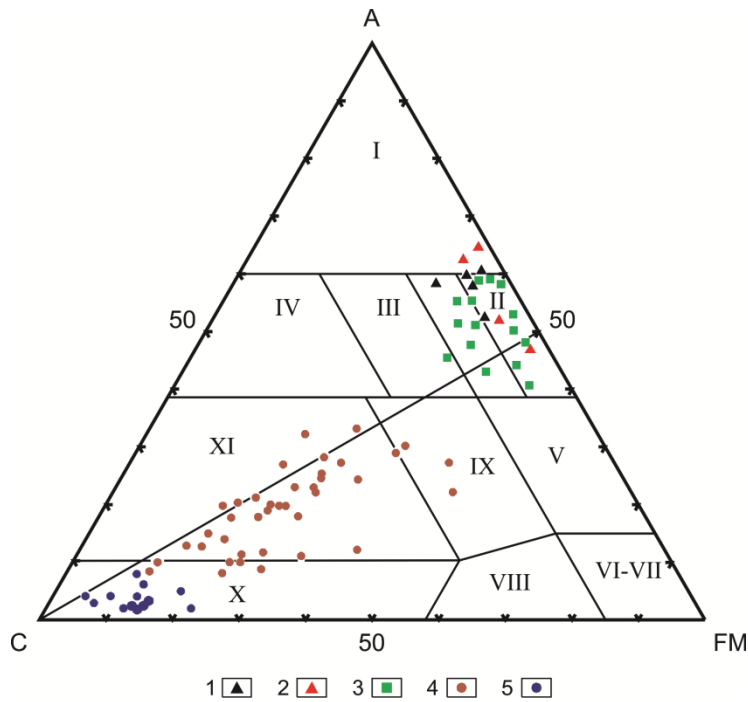


Рис. 4. Состав метаморфических пород Олимпиадинского месторождения

A – коэффициент глиноземистости = $(Al_2O_3 \cdot 100) / (Al_2O_3 + MgO + CaO + 2Fe_2O_3 + 2FeO)$; M – коэффициент магнезиальности, C – коэффициент известковистости, F – коэффициент железистости. Поля пород: I – собственно алюмосиликатных; II – железисто-магнезиально-алюмосиликатных; III – щелочноземельно-алюмосиликатных; IV – известково-алюмосиликатных; V – глиноземисто-магнезиально-железистых; VI – железисто-кремнистых; VII – магнезиальных; VIII – щелочноземельно-малоглиноземистых; IX – щелочноземельно-глиноземистых; X – известково-карбонатных; XI – глиноземисто-известковых. 1–5 – фигуративные точки составов пород на диаграмме: 1 – углеродистые кварц-серичитовые сланцы; 2 – углеродистые биотит-хлоритоидные сланцы; 3 – кварц-гранат-двуслюдяные сланцы; 4 – двуслюдяные кварц-кальцитовые сланцы; 5 – сланцеватые мраморы

Fig. 4. Composition of metamorphic rocks of Olimpiada field

A – alumina coefficient = $(Al_2O_3 \cdot 100) / (Al_2O_3 + MgO + CaO + 2Fe_2O_3 + 2FeO)$; M – magnesia coefficient, C – calcareousness coefficient, F – ferruginosity coefficient. Rock fields: I – properly alumosilicate; II – ferruginous-magnesia-alumosilicate; III – alkali-earth-alumosilicate; IV – calcareous-alumosilicate; V – alumina-magnesia-ferruginous; VI – ferruginous-siliceous; VII – magnesia; VIII – alkali-earth-low-alumina; IX – alkali-earth-alumina; X – calcareous-carbonate; XI – alumina-calcareous. 1-5 – figurative points of rock compositions on diagram: 1 – carboniferous quartz-sericite slates; 2 – carboniferous biotite-chloritoid slates; 3 – quartz-garnet-two-mica slates; 4 – two-mica quartz-calcite slates; 5 – schistose marbles

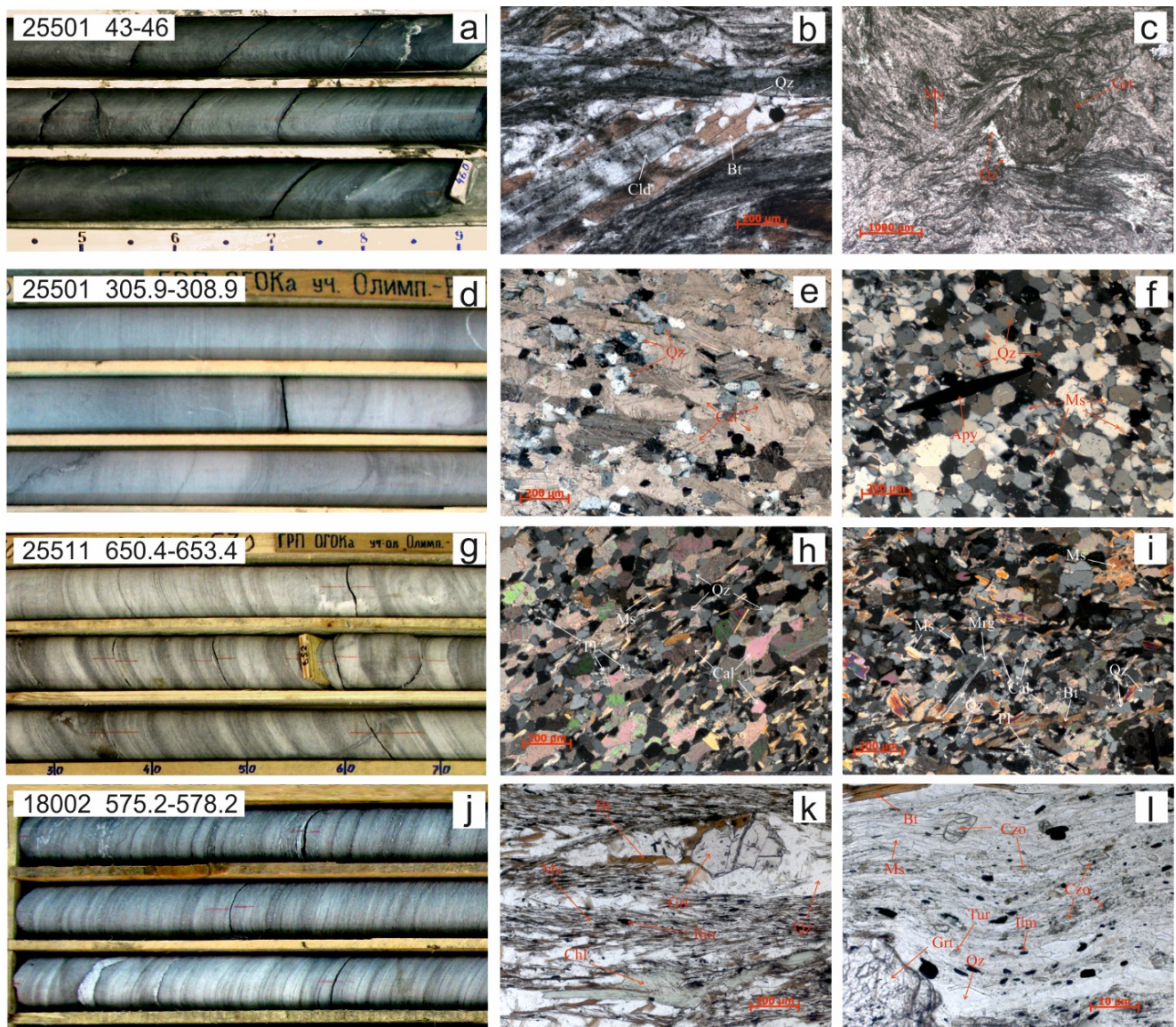


Рис. 5. Главные типы пород месторождения

Керн и шлифы: а–с – углеродистый blastsмилонит: а (кern) – линзовидная механическая сланцеватость породы, b (шлиф) – биотит-хлоритоидный углеродистый blastsмилонит с линзовидной механической сланцеватостью, с (шлиф) – гранат-хлоритоид-мусковитовый углеродистый blastsмилонит. Структура «снежного кома» в гранате. Микроплойчатая структура мусковит-кварцевой основной ткани; d–f – сланцеватые мраморы: d (кern) – широкая полосчатость породы, e (шлиф) – гранобластическая микроструктура кварц-кальцитового агрегата безрудной породы, f (шлиф) – апокарбонатный кварцит рудного интервала. В центральной части игольчатый кристалл арсенопирита в сотовом агрегате кварца; g–i – двуслюдяной кварц-кальцитовый сланец: g (кern) – полосчатая, мелкокладчатая текстура породы, h (шлиф) – лепидогранобластовая микроструктура сланца, i (шлиф) – окварцованный слюдистый кварц-карбонатный сланец. Беспорядочная ориентировка слюды в породе рудного интервала; j–l – гранат-двуслюдяно-кварцевый сланец: j (кern) – механическая полосчатость сланца, k (шлиф) – порфиробласты граната в лепидобластовой основной ткани. Кварц образует линзы гранобластического агрегата, l (шлиф) – клинозоизит, мусковит, турмалин в измененном сланце. Цифры на фото: номер скважины, глубина интервала керна (м)

Fig. 5. Main types of rocks of deposit

Core and thin sections: a–c – carboniferous blastomylonite: a (core) – lens-shaped mechanical rock schistosity, b (thin section) – biotite-chloritoid carboniferous blastomylonite with lens-shaped mechanical schistosity, c (thin section) – garnet-chloritoid-muscovite carboniferous blastomylonite. “Snowball” structure in garnet. Micropleated structure of muscovite-quartz main tissue; d–f – schistose marbles: d (core) – wide rock banding; e (thin section) – granoblastic microstructure of quartz-calcite aggregate of barren rock, f (thin section) – apocarbonate quartzite of ore interval. In the central part needle-like arsenopyrite crystal in cellular quartz aggregate; g–i – two-mica quartz-calcite slate: g (core) – banded micro-folded rock texture, h (thin section) – lepidogranoblastic microstructure of slate, i (thin section) – silicified micaceous quartz-carbonate slate. Disorderly orientation of micas in rock of ore interval; j–l – garnet-two-mica-quartz slate: j (core) – mechanical slate banding, k (thin section) – garnet porphyroblasts in lepidoblastic main tissue. Quartz forms lenses of granoblastic aggregate, l (thin section) – clinozoisite, muscovite, tourmaline in altered slate. Digits in the photo: drillhole number, core interval depth (m)

Участки с повышенным содержанием мусковита (до 25%) характеризуются развитием крупночешуйчатых псевдоморфоз минерала по биотиту. Отдельные пакеты биотита в псевдоморфозах сохранились от полного замещения. В псевдоморфозах и окружающем межзерновом пространстве развивается обильная тонкая вкрапленность рутила. Процесс формирования пород завершился сульфидизацией – отложением раннего пирротина и пирита, импрегнацией игольчатого арсенопирита, незначительным образованием сурьмяной минерализации. Арсенопирит очень часто прорастает биотит, но тяготения арсенопиритовой вкрапленности к биотитовым полоскам не отмечено.

В породах осевой части Медвежинской антиклинали среди двуслюдяных кварц-кальцитовых сланцев выделяются параллельные линзы окварцованных и сульфидизированных мраморов, которые хорошо отличаются по своей белой окраске. В них развита реликтовая полосчатость в виде вкрапленности сульфидов по поверхностям раздела полос. Структура пород мелкозернистая, сахаровидная, размер минеральных зерен 0,1–0,2 мм. В их составе преобладающую роль играют перекристаллизованные и неравномерно распределенные кварц и кальцит, при этом кварц образует линзочки среди существенно кальцитовой ткани. Количество мусковита, реликтовых плагиоклаза, хлорита и маргарита обычно не превышает 10%. Постоянно присутствует субмикроскопический рутил (менее 0,007 мм), редко – бледно-зеленый турмалин и апатит. В разрезе тел «обеленных» метасоматитов отмечаются существенно кальцитовые (около 50% объема), кварц-кальцитовые (~10%) и кварцевые (~40%) обособления, при этом последние сопровождают сульфидные образования в виде пятен мощностью от сантиметров до первых десятков сантиметров.

Кварц-гранат-двуслюдяные сланцы слагают нижнюю часть разреза стратифицированной толщи месторождения и распространены в ядрах лежащих складок, осложняющих северное крыло Медвежинской антиклинали. Они характеризуются серо-зеленой окраской обычно с коричневатым оттенком. В разрезе толщи силикатных сланцев проявлена нитевидная (0,1 см), тонкая (0,5–1 см) и широкая (>10 см) полосчатость, обусловленная изменением цветовых оттенков в полосках (рис. 5, *j-l*). Границы между полосками постепенные. Около 50% разреза толщи сланцев собрано в мелкую складчатость. Чуть меньше по объему в толще гранат-двуслюдяных сланцев занимают будинированные и милонитизированные породы. Практически всегда в породах толщи проявлен кливаж и в сочетании с ним – микроплойчатость или микроразлинзование.

Минеральный состав основной массы кварц-гранат-двуслюдяных сланцев представлен биотитом

(15–35%), мусковитом (5–40%), кварцем (20–40%). На фоне тонкозернистой (0,05–0,005 мм) основной массы выделяются микропорфириобласты сиреневого альмандина (0,5–1,3 мм) и зеленого хлорита (1–1,5 мм). Распределение граната в породе равномерное, редко превышающее 3–5%. Хлорит-рипидолит обычно имеет овальную форму, располагается цепочками одиночных чешуек в трещинках кливажа, секущих полосчатость. Количество порфириобласт хлорита чуть более или равно содержанию граната. В замках мелких складок и в линзах скольжения количество кварца возрастает, вплоть до мономинеральности. В светлоокрашенной части породы наряду с кварцем присутствует серицитизированный плагиоклаз № 28–35 (5–30%, редко более). В незначительных количествах в сланцах присутствует метасоматический карбонат (до 5%). Акцессорные минералы представлены турмалином (менее 2%), апатитом (менее 1%), пиритом и пирротинном. В пределах рудных тел гранат-двуслюдяные сланцы мусковитизированы и окварцованы, однако макроскопически они незначительно отличаются от безрудных пород. В этих интервалах отмечаются более крупная зернистость с обильным мусковитом и сульфидной минерализацией. Для измененных пород характерна примесь карбоната в основной массе и в прожилках. Гранат редко сохраняется в неизменном виде и замещается хлоритом. Количество биотита обычно уменьшается вплоть до полного исчезновения, а содержание мусковита увеличивается до 60–70%. В мусковитизированной рудной толще отмечаются гнезда окварцованных пород, в которых количество мусковита резко подчинено кварцу. Характерной особенностью пород является присутствие пойкилобластов титанита. Минерал имеет ситовидное строение с обильными включениями кварца, иногда клиноцоизита и карбоната. Титанит часто ассоциирует с пирротинном в виде сростаний и включений мельчайших зерен пирротина. В некоторых случаях отмечаются субмикроскопические жилки пирротина секущие пойкилобласты титанита. Редко в сфене встречаются идиобласты игольчатого арсенопирита. Как правило, кварц-гранат-двуслюдяные сланцы редко содержат промышленное оруденение.

Метаморфизм и гидротермальные изменения. Осадочные породы района месторождения метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма андалузитового типа (зона граната) [Звягина, 1989; Likhanov et al., 2013]. Региональные метаморфические преобразования представлены гранат-мусковит-биотитовыми минеральными комплексами по первично алевропелитовым осадочным породам. На фоне регионального метаморфизма в пределах Олимпиадинского рудного поля развита локальная зона динамотермального метаморфизма и метасоматоза со своеобразной

зональностью. Пространственно она ограничена рамками долгоживущей подвижной зоны вдоль рудоносного горизонта, сложенного химически активными карбонатными породами и пластичными угле-

родистыми сланцами. В целом она повторяет контур складчатой структуры, при этом ее границы параллельны литологическим, однако обычно не совпадают с ними (рис. 3, 6).

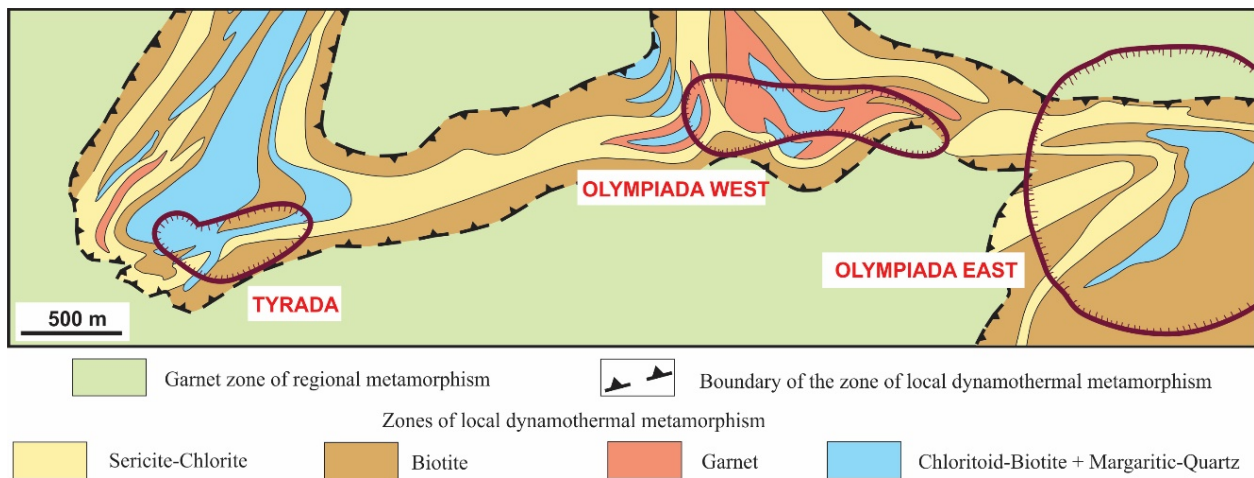


Рис. 6. Схематическая карта метаморфической зональности южной части Олимпиадинского рудного поля [Звягина, 1989]

Fig. 6. Schematic map of metamorphic zoning in southern part of Olimpiada ore field [Zvyagina, 1989]

Крылья складок сложены преимущественно ассоциациями зеленосланцевой фации (зоны серицит+хлорит и биотита, $T = 400\text{--}420^\circ\text{C}$, $P = 3\text{--}4$ кбар), которые расположены симметрично относительно оси подвижной зоны. Зона серицита и хлорита контролируется положением зон межпластового скольжения. Температура метаморфизма в зоне биотита, определенная по содержанию титана в биотите [Henry, Guidotti, Thomson, 2005], – $420\text{--}450^\circ\text{C}$. К осевой части подвижной зоны и к замкам складок тяготеют парагенезисы эпидот-амфиболитовой фации. Степень метаморфизма в пределах зоны возрастает по мере приближения к зонам эпидот-амфиболитовой фации как регионального, так и локального метаморфизма. Наиболее высокотемпературные ассоциации метапелитов в тектонической пластине соответствуют зоне граната (гранат + кварц + биотит \pm плагиоклаз), эпизодически в их составе отмечаются фибролит-силлиманит и кианит. Повышенные давления, соответствующие кианитовому типу метаморфизма, определяются по минеральным ассоциациям в метапелитах – хлоритоид + биотит \pm гранат, а в метамергелях – маргарит + кварц. Температуры, определенные по гранат-биотитовому термометру [Holdaway, 2000] – $580\text{--}605^\circ\text{C}$; по биотитовому термометру [Henry, Guidotti, Thomson, 2005] – $590\text{--}595^\circ\text{C}$. Абсолютные значения давления, определенные по гранат-биотит-плагиоклаз-кварцевому барометру [Wu, Zhang, Ren, 2004] составили $7,2\text{--}7,5$ кбар.

Наиболее типичными гидротермальными изменениями пород рудоносной минерализованной зоны яв-

ляются производные кальциевых и кремнистых метасоматитов, иногда с обильной рутилизацией, турмалинизацией, графитизацией (битумизацией) и сульфидизацией (см. рис. 3). Особенно тесная пространственная связь золота установлена с сульфидами.

Широким развитием в рудном поле пользуются предрудные кальциевые метасоматиты. Они приурочены к участкам милонитизации и переслаивания химически неоднородных литологических пачек углеродистых, карбонатных, силикатно-карбонатных и силикатных пород. Макроскопически эти метасоматиты практически неотличимы от неизмененных пород – в них сохраняются реликтовая полосчатость, цвет, зернистость, при этом отмечаются новообразования клиноцоизита, цоизита, сфена, граната, калишпата и альбита. Кислотный метасоматоз кремнистого типа проявлен повсеместно в поле развития рудных тел. В результате этого процесса в карбонатных и карбонатсодержащих породах развиваются зоны пятнистого окремнения (окварцевания), которые образуют незначительные по мощности тела и редко прослеживаются выдержанными горизонтами в соседних скважинах. Среди кислотных метасоматитов в пределах рудных тел отмечаются существенно кальцитовые породы, вероятно, образовавшиеся в результате отгонки извести на фланги окварцованных пород. Участками развиты обеленные окварцованные мраморы, представляющие продукты кислотного выщелачивания железомagneзиальных породообразующих минералов. Время проявления кислотного (кремнистого) метасоматоза внут-

рирудное, после образования вкрапленности игольчатого арсенипирита – в интервале между арсенипиритовой и галенит-сфалеритовой стадиями рудного процесса. В целом кислотные метасоматиты, развитые на месторождении, имеют много общего с джаспероидами, однако процесс окремнения (окварцевания) карбонатной матрицы проявлен не в полной мере. В породах рудного поля в повышенных концентрациях отмечается турмалин, который образует слабо выраженные полосы вдоль зон рассланцевания, дизъюнктивных и пликвативных нарушений в сланцевой толще рудной зоны. Он представлен изоморфной смесью дравита, увита и шерла, образует идиоморфные кристаллы с беспорядочной ориентировкой относительно сланцеватости либо полосчатости размером 0,01–0,08 мм. Судя по нашим наблюдениям, боровый метасоматоз развивался в предрудный этап и прямой корреляции с промышленной золотоносностью не имеет.

Главная роль в формировании Олимпиадинского месторождения принадлежит сульфидизации, при этом образование сульфидной вкрапленности осуществлялось метасоматическим путем и выполнением микротрещин. Минеральный состав метасоматитов, несущих золото-сульфидное оруденение, в подавляющем большинстве случаев имеет мусковит-кварц-кальцитовый состав со значительными вариациями содержаний этих минералов. Сульфидная минерализация по видовому составу и взаимоотношениям минералов практически идентична на всех участках рудного поля. Основным концентратором золота является тонкоигольчатый арсенипирит. Этот минерал может присутствовать в скарноидах, кварц-карбонатных с клиноцоизитом, существенно кварцевых и существенно карбонатных метасоматитах, в то же время устойчивой корреляции между содержаниями метасоматических минералов и арсенипирита не наблюдается.

Метасоматические ассоциации (клиноцоизит + титанит) в метапелитах и (гранат + клиноцоизит + актинолит + титанит) в метамергелях [Винклер, 1979] формировались в интервале температур 320–480°C и давлений 1,3–3,5 кбар. Температура образования мусковита из кварц-мусковит-карбонатных метасоматитов рудных тел, определенная по парагонит-фенгитовому геотермобарометру [Добрецов, 1977], составила 290–380°C, давление – 1,0–3,5 кбар.

До конца не выяснена роль в рудообразующем процессе углеводородов – метановых, нафтеновых, ароматических, смол, асфальтенов, которые обнаружены методом люминесцентной микроскопии в ассоциации с сульфидами продуктивных комплексов Восточной Олимпиады в концентрациях 0,02–0,06%. Во флюидных включениях в жильном кварце и кварце рудных метасоматитов методом газовой хромато-масс-спектрометрии выявлены алифатические, циклические, кислородсодержащие и гетероциклические углеводороды.

Продуктами самого позднего низкотемпературного метасоматоза, проходившего при существенном участии флюидов поверхностного происхождения, являются рыхлые гидрослюдисто-кварцевые образования, локализованные в наиболее тектонизированной части месторождения Олимпиада. Вероятно, в этом случае имело место пространственное совмещение гипергенного корообразования и низкотемпературной гидротермальной аргиллизации. Такие образования аномально обогащены Au, W, Pb и традиционно рассматриваются как образования коры выветривания. По данным [Стороженко и др., 2002], в зоне окисления на Олимпиадинском месторождении на глубине 5–28 м обнаружены палеоген-четвертичные спорово-пыльцевые спектры, постепенно сменяющиеся на глубине 30–60 м спектрами мезозойского, а с 50–110 м – палеозойского (верхний девон, карбон, пермь) облика.

Характеристика руд. Гипогенные (первичные сульфидные) и гипергенные (окисленные) руды Олимпиадинского месторождения имеют существенные отличия в вещественном составе и, как следствие, в технологических свойствах [Генкин и др., 1994; Бернатонис, 1999; Ли, 2003; Совмен и др., 2009].

Первичные сульфидные руды слагают основные запасы месторождения. Они распространены в карбонатной и силикатно-карбонатной пачках. Главными минералами руд являются: карбонаты (кальцит, анкерит) – 35–40%, кварц – 30–43%, слюды (мусковит – 8–10%, биотит – 10–15%) и хлорит (магнезиальный) – $n \times 1\%$. Роль других минералов незначительна, за исключением клиноцоизита, содержание которого на отдельных участках достигает 7,5 вес.%. Содержание сульфидов изменяется от 2 до 5–7%. Химический состав сульфидных руд отражает минеральный и характеризуется ведущей ролью SiO₂, CaO, Al₂O₃, CO₂, MgO и Fe_{общ} (табл. 2) [Совмен и др., 2009]. Пределы колебаний этих компонентов довольно широкие, как и As и Sb, количество которых варьирует в зависимости от развитой в рудах соответствующей минеральной ассоциации. Главным ценным элементом руд является Au с сопутствующими Ag и Sb.

Золото в первичных сульфидных рудах имеет довольно широкое распространение. В основном оно тонкое, пылевидное. В измельченной до –0,074 мм руде свободного золота около 15%. Большая часть металла (до 45%) присутствует в цианируемой форме в сростках с минералами руды. Микронные частицы самородного золота распространены во включениях в кварце (35%), арсенипирите (35%), пирите и марказите (15%), пирротине (5%), бертьерите и антимоните (5%), карбонатах (5%), гудмундите (ед. з.), халькопирите (ед. з.), тетраэдрите (ед. з.), гудмундит-пирротинном симплектите (ед. з.) и мусковите (ед. з.) (рис. 7).

Химический состав сульфидных Au-As руд Олимпиадинского месторождения

Chemical composition of sulfide Au-As ores of Olimpiada deposit

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S _{общ}	S _{сульф}	CO ₂	C _{орг}	As	Sb	Au, г/т
50,48	0,54	12,82	5,88	0,32	3,14	16,44	1,76	0,05	0,11	0,53	0,46	8,16	0,18	0,19	0,05	5,0

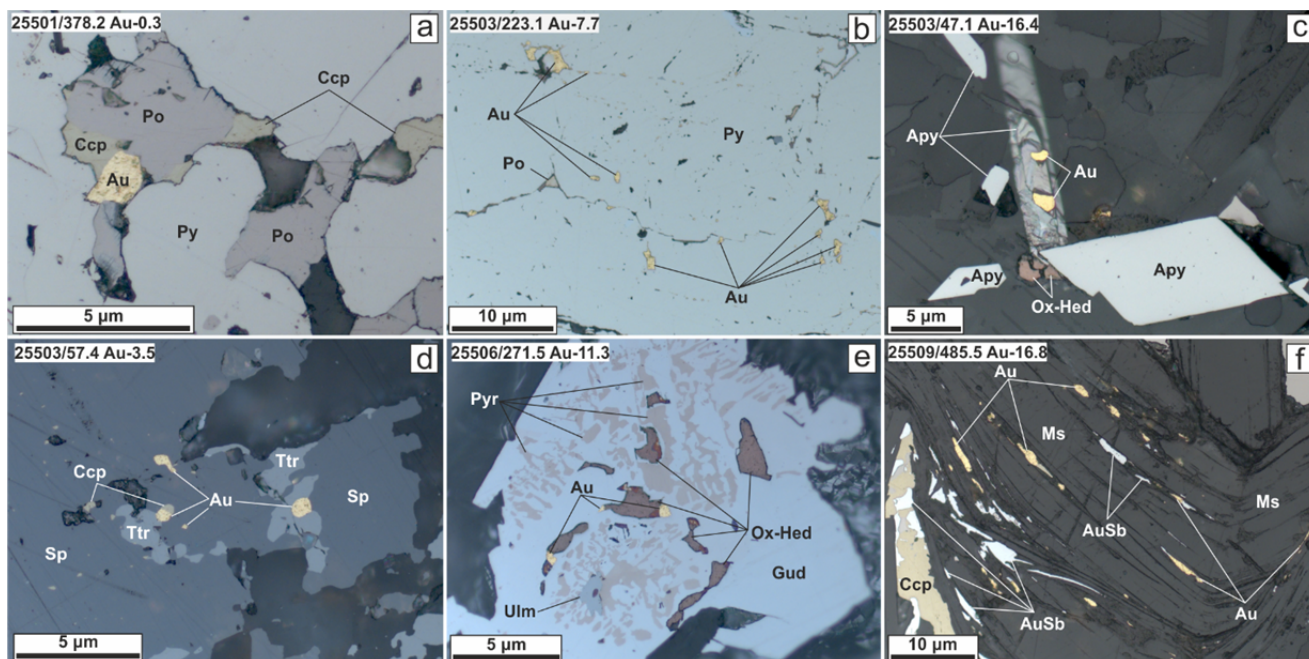


Рис. 7. Ассоциации золотой минерализации

a–d – ранние сульфиды золото-мышьяковой ассоциации; e–i – ассоциации минералов сурьмяной стадии. 25509/485.5 Au – 16,8 – номер образца (скважина / глубина), содержание Au г/т. Сокращения названий минералов: Apy – арсенопирит, Au – золото, AuSb – ауристибит, Po – пирротин, Py – пирит, Ccp – халькопирит, Ox-Hed – окисленный хедлейит, Ttr – тетраэдрит, Sp – сфалерит, Ulm – ульманит, Ms – мусковит

Fig. 7. Gold mineralization associations

a–d – early sulfides of gold-arsenic association; e–i – associations of minerals of antimony stage. 25509/485.5 Au-16.8 – specimen number (drillhole/depth), Au grade, g/t. Mineral acronyms: Apy – arsenopyrite, Au – gold, AuSb – aurostibite, Po – pyrrhotite, Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite, Ox-Hed – oxidized hedleyite, Ttr – tetrahedrite, Sp – sphalerite, Ulm – ulmanite, Ms – muscovite

Количество упорного, неизвлекаемого цианированием, золота в сульфидных рудах достигает 39–60%. Оно извлекается с использованием технологии биоокисления [Совмен и др., 2009].

Концентрации серебра в рудах (до 2–3 г/т) связаны с наличием в рудах самородного серебра, землистого аргентита и электрума [Бернатонис, 1999]. Контуры золотого и серебряного оруденения пространственно не совпадают. Повышенные содержания серебра отмечены в пирротине и прожилках кальцита. Большая часть серебра связана с минералами полисульфидной и антимонит-бертьеритовой ассоциаций.

Минеральные комплексы первичных руд. Устойчивые минеральные комплексы стадийного образования минералов объединяются в последовательный ряд, разделенный тектоническими перерывами в отложении минералов (табл. 3).

Ранний вкрапленный сульфидный комплекс золото-мышьяковых руд состоит из арсенопирита, пирита, пирротина, сульфидов полиметаллов и самородного золота. Он распространен в окварцованных и мусковитизированных метасоматитах, двуслюдяно-кварц-карбонатных сланцах.

Поздний вкрапленно-прожилковый золото-сурьмяный (бертьерит-стибнитовый) комплекс с более крупным, редко с видимым самородным золотом и ауристибитом проявлен с наложением на минеральные ассоциации раннего продуктивного комплекса, но развит преимущественно в юго-восточном блоке Восточной Олимпиады в зоне влияния Медвежьего разлома. Участки совмещения отличаются высокими продуктивными содержаниями золота. С этим же комплексом предположительно ассоциирована основная часть шеелита.

Таблица 3

Схема последовательности рудного минералообразования на Олимпиадинском месторождении (по А.М. Сазонову)

Table 3

Ore mineral formation sequence map for the Olimpiada deposit (as per A.M. Sazonov)

Mineral \ Assemblage	Early sulphides	Polymetallic sulphides	Late sulphides	Post-ore minerals
Rutile	=====			
Muscovite	=====			
Biotite	=====			
Graphite	=====			
Quartz	=====	=====	-----	
Carbonate		=====	=====	
Fluorite				=====
Pyrrhotite Fe _{1-x} S	=====	-----	-----	
Arsenopyrite FeAsS	=====	-----	-----	
Native gold	=====	-----	-----	
Pyrite FeS ₂	=====	=====	=====	
Chalcopyrite CuFeS ₂	=====	=====	=====	
Sphalerite ZnS		=====	-----	
Galena PbS		=====		
Cubanite CuFe ₂ S ₃		=====		
Bornite Cu ₅ FeS ₄		=====		
Berthierite FeSb ₂ S ₄			=====	
Stibnite Sb ₂ S ₃			=====	
Cobaltite CoAsS			=====	
Coloradoite HgTe			=====	
Plagionite Pb ₂ Sb ₂ S ₁₇			=====	
Hedleyite Bi ₂ Te ₃			=====	
Altaite PbTe			=====	
Ullmannite NiSbS			=====	
Gersdorffite NiAsS			=====	
Native antimony			=====	
Marcasite FeS ₂			=====	
Breithauptite NiSb			=====	
Mackinawite (Fe,Ni) ₈ S ₈			=====	
Willyamite (Co,Ni)SbS			=====	
Aurostibite AuSb ₂			=====	
Tetrahedrite (Cu,Fe) ₁₂ Sb ₂ S ₁₃			=====	
Gudmundite FeSbS			=====	
Jamesonite Pb ₂ FeSb ₂ S ₁₄			=====	

Примечание: сплошными линиями показано первичное образование минералов, пунктирными – их перекристаллизация.

Note: solid lines show the primary formation of minerals, dotted - their recrystallization.

Послерудный прожилковый флюорит-карбонатный минеральный комплекс отмечается повсеместно в пределах рудного поля при общей слабой интенсивности его развития. Возможно, с ним связана экзотическая для месторождения ртутная минерализация в тектонитах южной части Восточной Олимпиады.

Рудные минералы формируют полосчатую вкрапленность зернистых агрегатов вдоль трещин кливажа, механической сланцеватости и полосчатости пород, прожилки и гнезда мощностью от первых миллиметров до первых сантиметров (рис. 8).

Структуры руд в основном тонкозернистые метакристаллические с элементами перекристаллизации и укрупненно-зернистыми гнездово-агрегатными

скоплениями вблизи разлинзованно-будинированного жильного кварца в шовных тектонических межслоевых зонах. Золотосодержащая минерализация концентрируется в пликативных и дизъюнктивных дислокациях, сопровождающих основные разрывные нарушения межпластового типа. Рудные тела выделяются по появлению концентрированных агрегатов арсенопирита, пирита, пирротина и стибнита, но границы рудных тел определяются опробованием. Руды делятся на арсенопиритовые, сурьмяные и совмещенные сурьмяно-арсенопиритовые. В качестве минералов-примесей, не представляющих практического интереса, присутствуют рутил, титанит, вольфрамит, шеелит, образующие тонкую

вкрапленность среди основной массы метасоматически измененных пород. Фрагмент пространственного распределения типов руд и золотоносность ос-

новных минеральных комплексов, оцененная по картированию минеральных ассоциаций на участке Восточной Олимпиады, приведены на рис. 9 и в табл. 4.

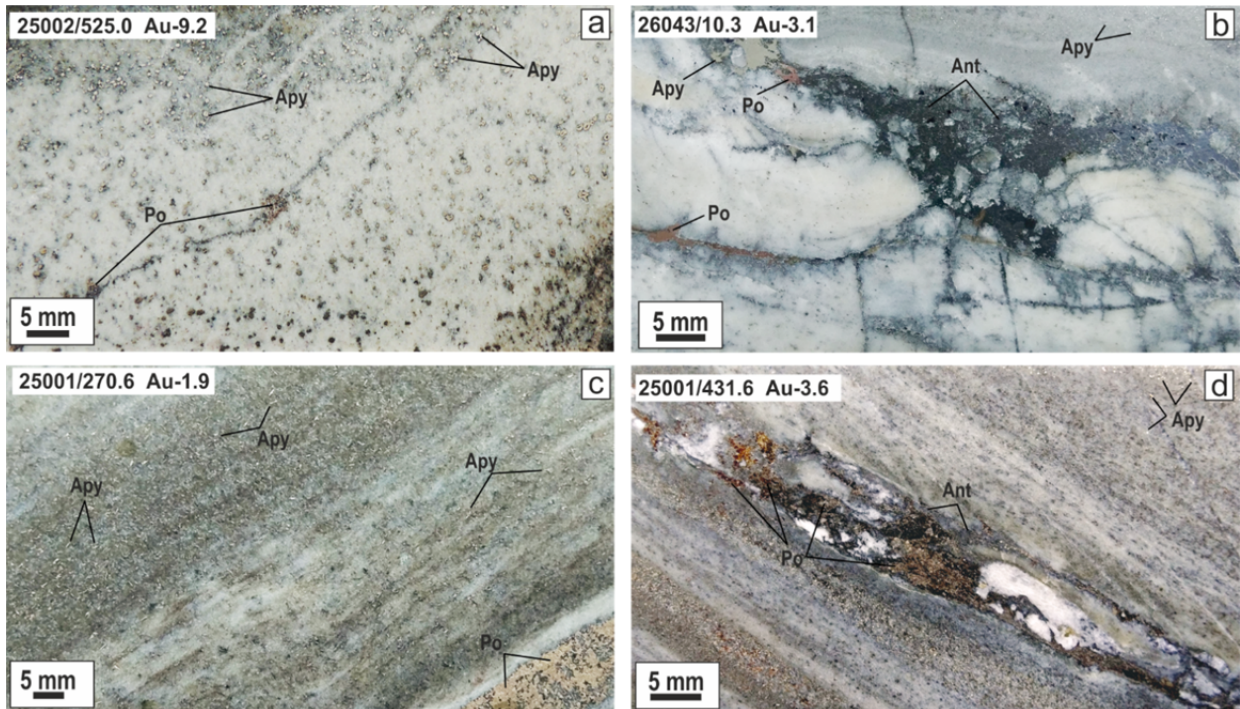


Рис. 8. Текстуры и структуры руд Олимпиадинского месторождения

25001/431.6 Au-3.6 – номер образца (скважина / глубина), содержание Au г/т

Fig. 8. Textures and structures of ores of Olimpiada deposit

25001/431.6 Au-3.6 – specimen number (drillhole / depth), Au grade, ppm

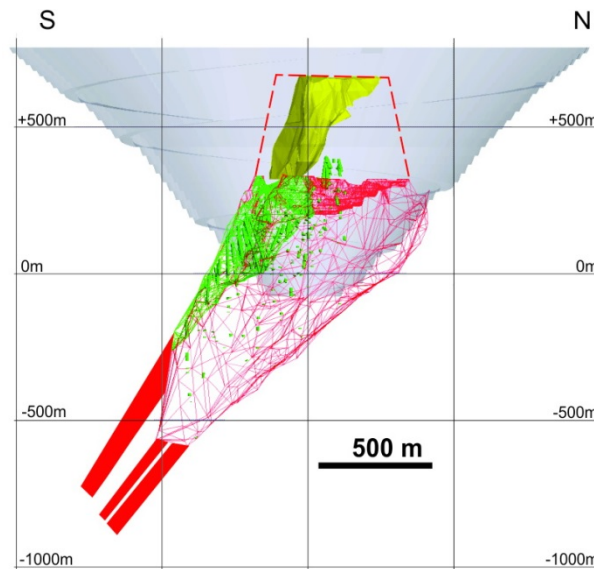


Рис. 9. Распределение типов руд (Восточная Олимпиада)

Желтым – окисленные руды (отработаны), зеленым – Sb > 0,4%, красным (каркас) – рудные тела по борту Au +0,75 г/т, красным (заливка) – рудные тела по данным глубокого бурения по борту +3 г/т, красным (пунктир) – контур отработанных на 01.01.2018 запасов, серым – контур Project Super Pit

Fig. 9. Distribution of types of ores (Eastern Olimpiada)

Yellow – oxidized ores (mined out), green – Sb > 0.4%, red (frame) – ore body, Au cut-off grade +0.75 g/t, red (filling) – ore bodies as per deep drilling data, cut-off grade +3 g/t, red (dotted line) – outline of reserves mined out as of 01.01.2018, gray – Project Super Pit outline

Таблица 4

Золотоносность минералогических типов руд

Table 4

Gold content of mineralogical ore types

Минеральные ассоциации в рудном интервале	Длина инт., м	Содержание золота, г/т
Рудное тело в изученном интервале в целом	260	4,8
Руды, содержащие арсенопиритовую минерализацию и сульфиды полиметаллов	110	3,9
Руды, содержащие минерализацию всех стадий	116	5,4
Руды, содержащие ассоциацию стибнит + бертьерит	34	2,9

Золото-мышьяковые руды. В интервалах рудного тела с ранними сульфидами (пирит + пирротин + арсенопирит + сульфиды полиметаллов) среднее содержание золота – 3,9 г/т. Сульфидная минерализация в рудах характеризуется ограниченным набором минералов, главными являются игольчатый и тонкопризматический арсенопирит, пирротин и пирит. Второстепенными являются халькопирит, сфалерит, борнит, кубанит (рис. 10, *a–d*).

Арсенопирит в этом типе руд представлен рассеянной тонкой вкрапленностью среди основной слюдяно-кварц-кальцитовый массы руды. Содержание минерала варьирует в пределах 0,1–5%, в среднем ~1–1,5%. Форма выделений арсенопирита иди-

оморфная тонко призматическая. Размер индивидуальных кристаллов от первых мкм до 1,5 мм по удлинению. Наиболее распространенными являются срастания с пирротинном, где арсенопирит образует многочисленные скелетные метакристаллы либо является футлярообразным носителем пирротина. Химический состав арсенопирита соответствует уровням содержания 32,19–35,63% Fe, 40,70–47,79% As, 18,75–23,07% S. Температура кристаллизации арсенопирита, определенная по диаграмме S/As-S+As/Fe [Сазонов и др., 2016] и геотермометру [Kretschmar, Scott, 1976; Scott, 1983], изменялась в интервале 300–460°C, при $\log a_{S_2} = -14,6 \dots -5,9$.

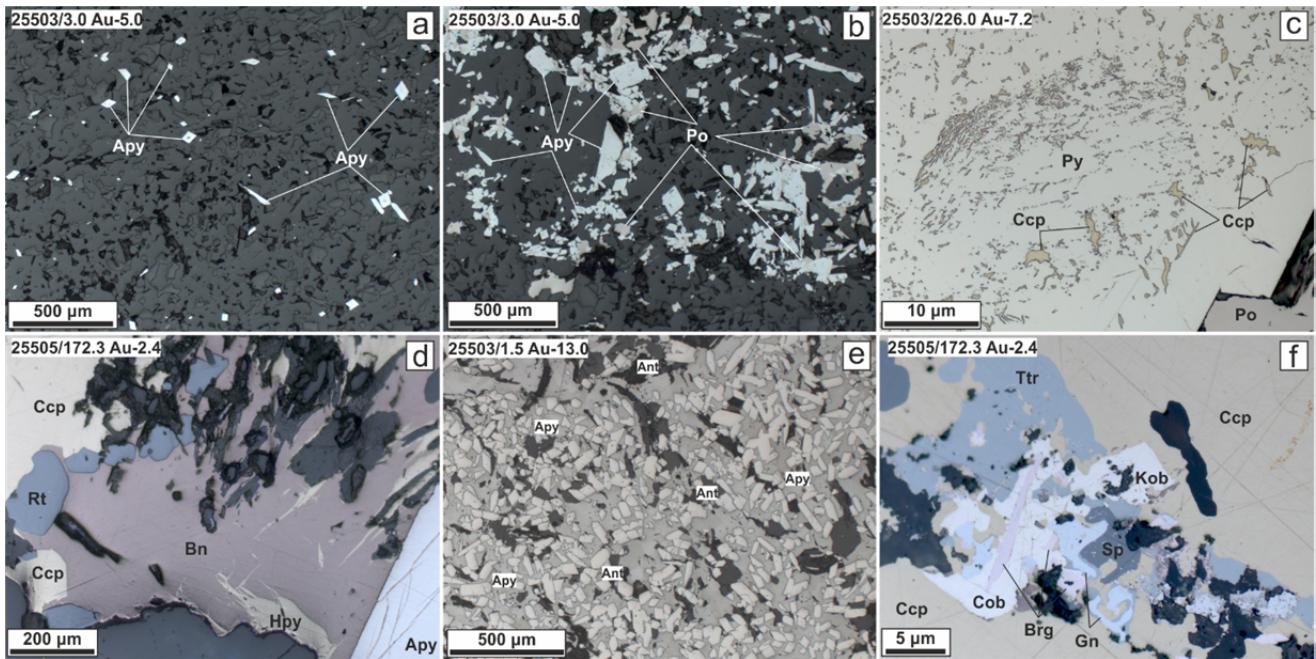


Рис. 10. Ассоциации рудных минералов

a–b – ранние сульфиды; *c–d* – сульфиды полиметаллов; *e–f* – сурьмяные минералы. 25509/485.5 Au-3.8 – номер образца (скважина / глубина), содержание Au г/т. Минералы: Ару – арсенопирит, Ро – пирротин, Ру – пирит, Сср – халькопирит, Вн – борнит, Рт – рутил, Ant – антимонит, Gud – гудмундит, Ттр – тетраэдрит, Соб – кобальтин, Sp – сфалерит, Brg – брейтгауптит, Gn – галенит, Бер – бертьерит

Fig. 10. Associations of ore minerals

a–b – early sulfides; *c–d* – polymetal sulfides; *e–f* – antimony minerals. 25509/485.5 Au-3.8 – specimen number (drillhole/depth), Au grade, g/t. Minerals: Apy – arsenopyrite, Po – pyrrhotite, Py – pyrite, Ccp – chalcopyrite, Bn – bornite, Rt – rutile, Ant – antimonite, Gud – gudmundite, Ttr – tetrahedrite, Cob – cobaltine, Sp – sphalerite, Brg – breithauptite, Gn – galena, Ber – berthierite

Пирротин в рядовых и особенно бедных рудах заметно преобладает над арсенопиритом. Широко распространен он и за пределами рудоносных участков, практически по всему маркирующему рудовмещающему горизонту с более интенсивным развитием в углеродсодержащих сланцах, очень редок в подстилающих, гранат-двуслюдяно-кварцевых сланцах. Наряду с мелко- и тонко вкрапленными выделениями пирротин нередко сегрегируется в полосы шириной от первых миллиметров до 7–8 см с более крупнозернистыми структурами агрегатов, а также образует сплошные грубозернистые скопления в краевых частях постоянно линзовидных обособлений крупнокристаллического кварца. Среднее содержание пирротина в рудах составляет 1,5–3,0%. Пирротин представлен в большинстве случаев сростаниями магнитной, моноклинной и немагнитной, гексагональной модификаций. Пирротин корродируется и замещается ассоциирующим с ним арсенопиритом, в котором часто сохраняются многочисленные реликтовые его микровключения. Кристаллизация главной массы пирротина осуществлялась при температуре 420–500°C и фугитивности серы $\log \alpha_{S_2} = -11,7 \dots -2,8$ рассчитаны по [Toulmin, Barton, 1964; Lambert, Simvich, Walker, 1998].

Микроскопические частицы золота встречены в единичных случаях при совмещении пирит-пирротин-арсенопиритовой минерализации и сульфидов полиметаллов. Они отмечаются в виде микронных включений в пирите, пирротине, арсенопирите, агрегатов размерами до 10–30 микрон в трещинах и на поверхностях зерен. Наиболее золотоносным является арсенопирит, до 4,7 кг/т. Распределение концентраций невидимого золота в арсенопирите – неравномерное как в пределах зерна, так и в соседних зернах. Помимо микровыделений золота предполагается наличие атомов внедрения золота в структуре минерала [Генкин и др., 1994; Генкин и др., 2002; Сазонов и др., 2016]. Повышение концентраций металла отмечается в сернистых разновидностях арсенопирита, кристаллизующегося при температуре 370–410°C при $\log \alpha_{S_2} = -7,9 \dots -7,1$. Золото, встречающееся совместно с пирротинном в виде микронных выделений в центральных частях зерен арсенопирита, располагается либо на контакте минералов, либо в полях пирротина, где нередко сопровождается реликтами карбонатов, слюд и кварца. Частицы золота характеризуются высокой пробой 940–1000‰. Примеси представлены серебром, медью и ртутью (0,2–5,9%).

Золото-мышьяк-сурьмяные руды. В рудных интервалах, содержащих минерализацию всех стадий концентрация золота – 5,4 г/т. В этих рудах сульфидная минерализация чрезвычайно разнообразная, образующая тесные сростания минералов систем Co-As-S, Ni-As-S, Ni-Sb-S, Pb-Sb-S, Cu-Sb-S, Co-Sb-S,

Hg-Te, Bi-Te, ассоциирующие с антимонитом, арсенопиритом, пирротинном, халькопиритом, золотом, аурустибитом с образованием симплектитовых, реакционных, каемочных структур (см. рис. 10, e–f). В рудах, содержащих стибнит и бертьерит, в незначительных количествах пирит, марказит, пирротин и в единичных зернах самородную сурьму, тетраэдрит, халькопирит, джемсонит, содержание золота снижается до 2,9 г/т. Отсутствие в рудах арсенопирита и других мышьяковых минералов коррелирует со снижением в них содержания золота.

Арсенопирит в ассоциации с минералами сурьмы имеет псевдо-дипирамидальную или короткопризматическую морфологию, которые при сростании имеют «звездчатые» (радиально лучистые) агрегаты. Размеры кристаллов достигают 5 мм в поперечнике. В составе минерала повышены концентрации: до 1,02% Sb; до 2,96% Co; до 0,74% Ni; до 0,07% Hg. Очень редко среди арсенопиритовых агрегатов появляется данаит. Температура рекристаллизации арсенопирита в минеральных ассоциациях золото-сурьмяных руд 330–290°C, пирротина – 280–200°C. Руды этого типа характеризуются наиболее частой встречаемостью частиц золота под микроскопом и макроскопически видимых агрегатов золота в трещинах и гнездах совместно с минералами сурьмы и теллуридами. Макроскопически видимые обособления золота встречаются исключительно редко. Среди богатых руд поздней ассоциации сульфидоантимонидов самородное золото и аурустибит образуют сростания и включения в антимоните, бертьерите, тетраэдрите, ульманните, халькопирите, карбонатах, слюдах; встречаются тонкие сростания с минералами никеля, кобальта и теллуридами висмута и ртути. Форма выделений золота и аурустибита – ксеноморфная, каемочная, каплевидная, пластинчатая, размеры выделений – от долей микрон до 70×120 мкм. Золото в этой ассоциации ярко-желтое до соломенно-желтого, красновато- и розовато-желтое. В подчиненном количестве в рудах установлено присутствие аурустибита, образующего выделения преимущественно в ассоциации со стибнитом, бертьеритом, сульфидоантимонидами, карбонатами и поздним кварцем. В большинстве случаев золото этого типа высокопробное – 995–1000‰. При замещении аурустибита образуется петельчатое («горчичное») химически чистое золото с пленками гидроксидов сурьмы. Микрорентгеноспектральным анализом в отдельных золотилах установлены высокие концентрации меди (до 41%, что близко к стехиометрии аурикуприта $AuCu_3$), ртути (до 37%, что соответствует составу вейшанита $(Au,Ag)_3Hg_2$). Особо следует отметить примесь никеля в самородном золоте (0,8–8,9%) и аурустибите (3,5–6,5%). В единичной золотине определена примесь Pt – 1,57 мас.%. Частицы золота с примесями ртути, меди, никеля

обычно имеют неоднородный состав с колебаниями концентраций этих элементов в пределах одного зерна. Золото с повышенной концентрацией ртути приурочено к подошве и кровле рудного тела мышьяк-сурьмяных руд.

Особое внимание привлекает устанавливаемая только на микроуровне тесная Au-Sb-Hg-Bi-Te-Ni-Cu-(Pt) ассоциация металлов и интерметаллидов в мышьяк-сурьмяных рудах: никелистые самородное золото и аурустибит $AuSb_2$, изоструктурный ему нисбит $NiSb_2$, а также брейтгауптит $NiSb$, амальгама золота, аурикуприт $AuCu_3$, самородные ртуть, сурьма, колорадоит $HgTe$, цумоит $BiTe$ и хедлейит Bi_7Te_3 . Это указывает на восстановленность позднего флюида.

Окисленные руды были представлены окрашенными в различные тона бурого, красного, темно-серого, оранжевого цвета, контрастно обособленными породами (рис. 11) [Яблокова, Коновалова, Сандомирская, 1986; Бернатонис, 1999]. К настоящему

времени окисленные руды на Восточном участке полностью отработаны.

Гранулометрический состав рыхлых окисленных руд по фракциям: дресвяная ~ 10%, песчаная ~ 10%, алевритовая ~ 16%, глинистая ~ 64%. Главные минералы руд: кварц (5–35%); гидрослюда (40–70%); гидроокислы железа (1–36%); каолинит (до 14%); хлорит (до 10%). Второстепенные и редкие минералы: эпидот, кальцит, биотит, актинолит, хлоритоид, клиноцоизит, гранат, плагиоклаз, ставролит, силлиманит, циркон, рутил, анатаз, брукит, сфен. Рудные минералы: золото, вольфрамит, шеелит, киноварь, арсенопирит, магнетит, антимонит, пирит, пирротин. Гипергенные минералы: вольфрамовые – тунгстит, гидротунгстит; мышьяковые – скородит и гидроксиды железа; сурьмяные: сервантит, валентинит, гидроромеит, скуокрицит, биндгеймит, стибиоконит. Сульфаты кальция и бария – гипс и барит. Химический состав окисленных руд изменчив и определяется составом окисляемых руд (табл. 5).



Рис. 11. Типичные окисленные золото-сульфидные руды Олимпиадинского рудного поля (месторождение Тырада)

Различная окраска окисленных руд обусловлена литологией, тектонической нарушенностью и минеральным составом первичных руд

Fig. 11. Typical oxidized gold-sulfide ores of Olimpiada ore field (Tyrada deposit)

Different coloring of oxidized ores is preconditioned by lithology, tectonic faulting and mineral composition of primary ores

Химический состав окисленных руд Олимпиадинского месторождения, мас.%

Таблица 5

Table 5

Chemical composition of oxidized ores of Olimpiada deposit, wt.%

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	п.п.п
70,73–94,05	0,08–0,09	1,74–14,21	0,68–6,55	0,25–0,57	0,02–0,85	0,19–1,01	0,28–0,32	0,38–3,68	0,04–0,21	0,13–0,21	0,48–2,81

Среднее содержание золота в окисленных рудах превышает концентрацию золота в первичных рудах в 2,3 раза, при изменении их плотности в 1,7 раза. Доля золота, связанного с глинистой фракцией

(в % от руды) – 38–62%. В глинистой фракции преобладают частицы размером 9 мкм.

Золото отмечается в виде свободных частиц, в сростании с кварцем, гидроксидами Fe, Mn, Sb, As и

в виде тонкодисперсных выделений во вторичных и реликтовых первичных минералах. Преобладают частицы золота с чистой поверхностью, частиц с пленками гидроксидов – около 20%. Преобладающий размер частиц золота – 0,071 мм (40–60%), более крупное золото (0,1–0,25 мм) составляет в окисленных рудах 5–10%, единичные частицы – 1–2,5 мм. Генетические типы золота представлены остаточным, гипергенным и сорбированным формами. Воднорастворимой и сорбированной форм золота, извлекаемых водным раствором роданида калия, ~6%, сульфидной и теллуридной, извлекаемых водным раствором азотной кислоты ~30%, самородной ~64%. Свободное золото из окисленных руд имеет пробность 790–1000‰, в среднем 950‰. Оно обеднено всеми элементами-примесями, особенно серебром. Доля гипергенного золота в окисленных рудах 1–2%. Морфологически это нитевидные, петельчатые, глобулярные, колломорфно-губчатые и ветвисто-дрозовые частицы. Вторичное («горчичное») золото было образовано за счет разложения тонкоигльчатого арсенопирита и аурустибита. Реже наблюдается пленочное золото, в метакolloидах оксидов и гидроксидов Fe, Mn и Sb. Остаточное мелкое золото сорбируется на поверхности чешуек гидрослюда. В целом участие гипергенного золота в обогащении окисленных руд представляется достаточно очевидным, но масштабы этого обогащения являются, по-видимому, не столь значительными [Ли, 2003].

Кроме золота в окисленных рудах присутствует вольфрамовая минерализация, которая в первичных рудах слабо проявлена [Новожилов и др., 1986]. Содержание WO_3 достигало 0,2–0,4%, он наблюдался в виде тонкодисперсного шеелита и гидротунгусита в ассоциации с оксидами железа и марганца. Окисленные руды аномально обогащены ртутью, золотом, сурьмой, вольфрамом и свинцом. Эндемичными для них являются окисные минералы с тесными взаимными изоморфными замещениями между сурьмой и вольфрамом, а также свинцом и ртутью, свидетельствующие о значительном перераспределении компонентов при формировании таких руд.

Распределение рудогенных элементов. Золоторудные тела Олимпиадинского месторождения сопровождаются эндогенными геохимическими ореолами, которые распространены в стороны и вверх от рудных тел на $n \times 10$ и $n \times 100$ метров. Они имеют линейно-вытянутую полосовидную и удлиненно-овальную форму, подчиненную складчатой структуре вмещающей толщи пород и продольным межпластовым разрывным нарушениям. Кроме золота контрастные ореолы образуют лишь три элемента – As, Sb, W. Выделяются геохимические ореолы Ag, Pb, Co, Ni, Mn и Zn, но их аномалии не всегда четко выражены и значительно уступают основным спутни-

кам золота по размерам. Интенсивность и размер ореолов во многом зависят от литологических и физико-химических свойств вмещающих пород и структурно-тектонических условий. Наиболее яркие и значительные по масштабам ореолы на Олимпиадинском месторождении сопровождают рудные тела в кварц-сланцево-карбонатных сланцах и мраморизованных известняках, которые отличаются повышенной химической активностью и проницаемостью, а также в зоне их тектонически нарушенного контакта с перекрывающими кварц-сланцево-углеродистыми сланцами. С удалением от зоны контакта и переходом в слабопроницаемые углеродистые сланцы интенсивность и размеры ореолов заметно уменьшаются. То же самое наблюдается и в подстилающих карбонатные породы кварц-гранат-сланцевых сланцах.

В первичных ореолах Западной Олимпиады поперечная зональность (от висячего бока рудного тела к лежащему) выражается следующим рядом: As-Sb, Mn, Au-W-Co-Ni-Pb-Mn. Последовательный ряд осевой геохимической зональности (в направлении к корневым частям) для этой части месторождения выглядит следующим образом: Au-As-Sb, W-(Co, Ni, Zn, Mn).

На Восточной Олимпиаде в поперечной зональности хорошо проявлено ассиметричное строение первичных геохимических ореолов [Ли, 2003], которое находит свое выражение и в минеральном составе главных рудных ассоциаций. В висячем боку рудной залежи (юго-восточный блок Восточного рудного тела) ведущую роль играют Sb, As и Mn. В лежащем (северный блок) наблюдается заметно меньшая роль Sb, при этом увеличивается относительное количество W, Co, Ni и Pb. Осевая геохимическая зональность по падению рудного тела на протяжении 700 м в интервале от –400 м до +100 м имеет следующий вид (снизу вверх): Au-As-Mo-Bi-W-Zn-Sn-(Ni, Co)-(Ti, Cu)-Sb-Ag.

Геохимические поля в окисленных рудах отражают отмеченную выше зональность минерально-геохимических парагенезисов и характеризуются высококонтрастными геохимическими ассоциациями элементов: Au (Sb, W, As, Pb, Ag); Au, W, Sb (As, Pb, Cu); Sb, Au (W, As).

Генезис месторождения

Образование месторождения обсуждается с позиции трех главных концепций: первично осадочной [Петров, 1974; Григоров, 2003 и др.], магматогенно-гидротермальной, в связи с гранитоидным или основным магматизмом [Ли и др., 1984; Новожилов, Гаврилов, 1999; Ли, 2003; Кучеренко, 2007; Коробейников и др., 2013 и др.], метаморфогенно-гидротермальной [Буряк, 1982; Сердюк и др., 2010;

Сазонов, 1998; Сазонов и др., 2010 и др.]. Золоторудный комплекс месторождений сформировался в позднепротерозойское время, в период мощного проявления гранитообразования в регионе. В рудном поле месторождения Олимпиада геохимическую связь с золотом имеют мышьяк, полиметаллы, сурьма, ртуть, висмут и вольфрам.

Возраст вмещающих оруденение карбонатно-терригенных пород кординской свиты составляет порядка 1450 ± 50 млн лет, при этом изотопные параметры Sm-Nd системы (ϵ_{Nd} -6.1, TDM-2st2422Ma) свидетельствуют о поступлении в бассейн осадконакопления переработанного в коре выветривания корового материала палеопротерозойских зеленокаменных поясов [Ножкин и др., 2008]. Детритовые цирконы из пород этой свиты имеют возраст более 1580 Ма [Савичев и др., 2006], а K-Ar возраст глауконита из песчаников перекрывающей погорюйской свиты составляет 1115 млн лет [Шенфильд, 1991].

В районе Олимпиадинского месторождения в неопротерозое проявился достаточно широкий спектр магматических пород, относящихся к разным магматическим комплексам. Выделяются несколько этапов их формирования: около 900 млн лет (тейско-ерудинский комплекс), 760–718 млн лет (аяхтинский и глушихинский) и 710–650 млн лет (гурахтинский, захребетинский комплексы) [Легенда... 2002]. Породы магматических комплексов являются производными преимущественно коровых расплавов с некоторой долей мантийных источников [Верниковский, Верниковская, 2006; Верниковский и др., 2016]. Гурахтинский и особенно захребетинский комплексы формировались преимущественно из мантийных магм в той или иной степени контаминированных коровым материалом [Ножкин, Борисенко, Неволько, 2011; Врублевский и др., 2017 и др.].

В пределах Олимпиадинского рудного поля гранитоиды представлены Тырадинским, Чиримбинским массивами и серией мелких образований, объединенных в группы Коноваловских и Енашиминских интрузий. Дайки щелочных сиенитов мощностью первых десятков сантиметров в районе распространены крайне ограниченно. Интерес представляет возраст интрузий щелочных фельдшпатоидных пород Заангарского массива, проявившихся в период активного золоторудогенеза в регионе [Сазонов и др., 2007; Федорова, Сазонов, 2012]. Результаты наших изотопно-геохронологических исследований приведены ниже.

1. Гранито-гнейс Тейского комплекса (U-Pb)	947,1±7,4 млн лет
2. Гранодиорит Среднетырадинский (U-Pb)	857 млн лет
3. Гранит Енашиминской группы интрузий:	
(Ar-Ar)	753±5,2 млн лет
(U-Pb)	767±3 млн лет

4. Щелочные сиениты Захребетинского комплекса (Ar-Ar)	696±8,5 млн лет
5. Нефелиновые сиениты, ийолиты, мусковитовые сиениты:	
Среднетатарского (Заангарского) массива (Rb-Sr и Sm-Nd)	680–610 млн лет
Фойяиты	675±5,8 млн лет
Мусковитовые сиениты	630=/-4,5 млн лет
Ийолиты	611±7,2 млн лет

По представлениям И.И. Лиханова и А.Д. Ножкина [Лиханов, Ревердатто, Вершинин, 2006; Лиханов и др., 2014; Ножкин и др., 2008; Ножкин, Борисенко, Неволько, 2011] метаморфические события в регионе проявились на рубеже мезо- и неопротерозоя (1050–850 млн лет) в связи с гренвильской орогенцией. В результате сформировались зональные метаморфические комплексы низких давлений ($dT/dH = 20\text{--}30^\circ\text{C}/\text{км}$). В позднем рифее (801–793 млн лет) эти породы подверглись коллизионному метаморфизму кианит-силлиманитового типа умеренных давлений ($dT/dH \leq 10^\circ\text{C}/\text{км}$). Завершающим явился синэкзгумационный метаморфизм с возрастом 785–776 млн лет ($dT/dH \leq 12^\circ\text{C}/\text{км}$).

Наши исследования изотопно-геохронологических систем метаморфогенно-метасоматических образований в районе месторождения приведены ниже.

Региональный метаморфизм (район мест-я Благодатное)	
1. Гранат-ставролитовый сланец (биотит, мусковит Rb-Sr и Sm-Nd)	1,05 млрд лет
Олимпиадинское рудное поле (тектоно-метаморфическая зона):	
2. Филлитовидный биотитовый сланец (5 определений, биотит, K-Ar)	792–856 млн лет
3. Цоизитовый скарноид (биотит, K-Ar)	847 млн лет
4. Кислотные метасоматиты (мусковит, K-Ar)	771–877 млн лет

За все время изучения Олимпиадинского месторождения выполнено более 50 определений абсолютного возраста рудной минерализации K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd и Re-Os методами, показавшими разброс датировок более 400 Ма (921–510 Ма) [Сазонов, 1998; Новожилов, Гаврилов, 1999; Ли, 2003; Савичев, 2004; Полева, Сазонов, 2012; Borisenko et al., 2014; Yakubchuk, Stein, Wilde, 2014]. Наши исследования геохронологии рудных образований месторождения, полученные в последние годы, приведены ниже [Гибшер и др., 2019].

1. Кварцевые жилы (3 определения, мусковит, Ar-Ar)	808–817 млн лет
2. Au-Apy-Po руды (8 определений, мусковит, Ar-Ar)	758–803 млн лет
3. Au-Apy-Sb руды (5 определений, мусковит, Ar-Ar)	660–795 млн лет

Термодинамические параметры метаморфогенно-метасоматического преобразования пород и рудообразования месторождения, полученные по исследованиям флюидных включений и минералогическим термоба-

рометрам [Toulmin, Barton, 1964; Kretschmar, Scott, 1976; Scott, 1983; Lambert, Simkovich, Walker, 1998; Сазонов и др., 2016; Гибшер и др., 2019].

Метаморфизм в тектонической зоне месторождения:	
Зеленосланцевая фация (зона хлорита и биотита)	400–420°C (до 420–450°C); 3,0–4,0 кбар
Зона граната	580–605°C; 7,2–7,5 кбар
Предрудный и внутрирудный метасоматоз:	
Основные метасоматиты (скарноиды)	320–480°C; 1,3–3,5 кбар
Кислотные метасоматиты (окварцевание и серицитизация)	290–380°C; 1,0–3,5 кбар
Рудообразование:	
Au-As руды:	
Кварц предрудных метасоматитов (незолотоносные кварц-слюдисто-сульфидные ассоциации)	220–325°C; 10,0–16,0 мас.% (NaCl-экв.); 0,6–2,2 кбар
Кварц рудного этапа (Qz-Au-Ars-Py-Pyr ассоциация)	260–470°C; 9,5–20,0 мас.% (NaCl-экв.); 1,1–2,5 кбар
Пирротин	420–500°C; Log α_{S_2} –11,7...–2,8
Арсенопирит	300–460°C; Log α_{S_2} –14,6...–5,9
Золотоносный арсенопирит	370–410°C; Log α_{S_2} –7,9...–7,1
Au-As-Sb руды:	
Кварц рудного этапа (Qz-Au-Sb ассоциация)	240–300°C; 5,5–8,0 мас.% (NaCl-экв.); 1,8–2,1 кбар
Пирротин (рекристаллизованный)	200–280°C
Арсенопирит	290–330°C
Пострудный кварц (кварц-карбонатные прожилки)	110–180°C; 0,5–3,0 мас.% (NaCl-экв.)

Исследование распределения редкоземельных элементов в сульфидах (арсенопирит, пирит, пирротин)

и самородном золоте Олимпиадинского месторождения показало, что они имеют различные тренды концентрирования РЗЭ по отношению к составу неизменных пород кординской свиты. Форма спектров большинства рассмотренных образцов (как сульфидов, так и золота) в целом сходна с распределением РЗЭ в породах кординской свиты (рис. 12, 1), что говорит о выносе металлов из пород при рудообразовании [Афанасьева и др., 1997; Kun et al., 2014].

На флюид метаморфогенного происхождения указывают форма этих спектров с преобладанием LREE и аномалиями Ce и Eu [Горячев и др., 2008] и интервал изменения отношений Y/No, который соответствует разбросу значений для регионально-метаморфизованных пород [Волков, Мурашков, Сидоров, 2016]. Часть рассматриваемых образцов (арсенопирит, пирит, золото) характеризуется формой спектров, сильно отличной от таковых для вмещающих пород (рис. 12, 2), что указывает на возможное участие флюида другого происхождения при рудообразовании. О глубинной природе этого флюида говорят обратная корреляция значений Σ REE и Eu/Eu* [Знаменский и др., 2014], наличие слабо выраженных тетрадных эффектов фракционирования РЗЭ [Monecke et al., 2002] и высокие Co/Ni отношения [Kun et al., 2014]. Наши исследования дополняют сведения об источниках вещества руд месторождения, полученные ранее по распределению изотопов Pb в главных сульфидах, S и O – в жильном кальците [Савичев и др., 2006], серы сульфидной [Заири и др., 1986; Кряжев, 2017], Os и Ne – в сульфидах [Naumov et al., 2015].

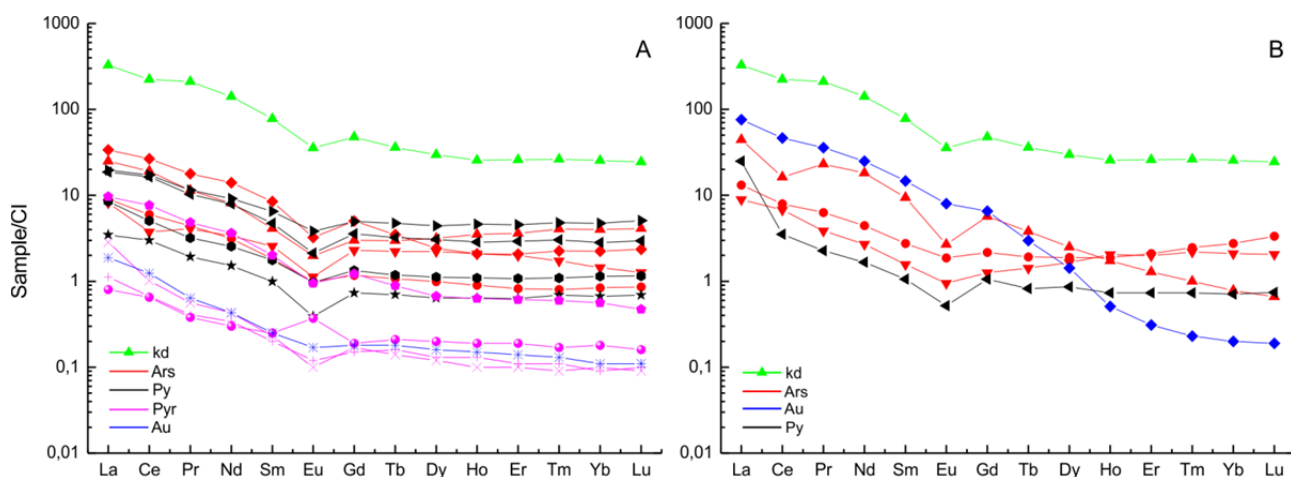


Рис. 12. Графики распределения REE в изученных образцах арсенопирита (Ars), пирита (Py), пирротина (Pyr) и самородного золота (Au)

1 – образцы со сходным для вмещающих пород распределением РЗЭ; 2 – образцы, распределение РЗЭ в которых отличается от вмещающих пород. Зеленая линия с подписью «kd» на всех графиках соответствует составу пород кординской свиты (данные взяты из [Лиханов и др., 2006])

Fig. 12. Diagrams of REE distribution in studied arsenopyrite (Ars), pyrite (Py), pyrrhotite (Pyr) and native gold (Au) specimens

1 – specimens with REE distribution similar to hosting rocks; 2 – specimens, REE distribution in which differs from distribution in hosting rocks. The green line with the kd label in all diagrams corresponds to the Kordinskaya suite rock composition (data collected from the work of [Likhonov et al., 2006])

Таким образом, полигенность источников рудного вещества и рудообразующих флюидов Олимпиадинского месторождения проявлена в результатах геохимических и изотопно-геохимических исследований. Согласно им источниками вещества для золото-арсенипиритового, золото-полисульфидного и золото-сурьмяного парагенезисов являются разные изотопные резервуары: мантийный магматический и заимствованный коровый.

Углеводороды в рудах и флюидных включениях. В агрегатах сульфидов, ассоциирующих с золотом, нами обнаружены смолистые битумоиды и асфальтены. Во флюидных включениях в жильном кварце, сульфидах и золоте методом газовой хромато-масс-спектрометрии выявлены алифатические, циклические, кислородсодержащие и гетероциклические углеводороды. В самородном золоте преобладают углеводороды и углекислота. Повышенные содержания CO_2 и углеводородов во флюидных включениях самородного золота согласуются с экспериментальными и расчетными данными, где показано, что углеводороды транспортируются богатыми CO_2 флюидами [Gizè, 1999]. А.А. Томиленко и Н.А. Гибшер с соавторами [Томиленко, Гибшер, 2001; Томиленко и др., 2008; Гибшер и др., 2011; Гибшер и др., 2017; Гибшер и др., 2019; Tomilenko et al., 2010] предполагают, что транспорт золота осуществляется преимущественно углеводородсодержащими флюидами, которые представляют собой рудный флюид. На это же указывают проведенные опыты по переносу Au, Zn, U углеводородами [Migdisov, Guo, Xu, 2017]. В ряде работ отечественных геологов, изучавших золоторудные месторождения [Николаева, 1954; Рябчиков, Новгородова, 1981; Петровская, 1973], отмечалось, что золото транспортируется сухими газоконденсатными восстановленными потоками, предположительно водород-углеводородного состава.

Недоизученная роль углеводородов в формировании месторождения подтверждается проявлением современной углеводородной дегазации на месторождении. Так, 25 июня 2018 г. при проходке разведочной скважины на Восточном карьере с глубины 260 м от устья скважины, из затрубного пространства между буровым снарядом и обсадной колонной, начался самопроизвольный излив промывочной жидкости, сопровождаемый пузырьками газа, имеющего запах бытового. По данным службы ВГСЧ рудника, состав газа – углеводороды (9,5–18%), угарный газ (до 934 г/т). Активная дегазация продолжалась в течении двух дней, полностью прекратилась через два месяца. Природа явления дегазации изучается. Одной из версий проявления газовой дегазации – вскрытие газово-жидких водород-углеводородных включений в минералах руд в результате

техногенных перемещений в глубинных тектонических блоках месторождения. В последние годы в карьере наблюдаются оползневые явления. Не исключается пульсирующее углеводородное «дыхание» глубинного заложения по разрывным структурам месторождения.

Авторы благодарят геологов компании «Полюс» Некрасова А.Ю., Поперекова В.А., Бородушкина А.Б., Шарипова Р.Г., Ильина С.С., Фоминых М.Н., Журавлева В.В., Попова А.Л., Лихмана А.М., Приданникова А.В., Логачева А.Н. за помощь в организации исследований на месторождении, в получении графических материалов по геологии месторождения, уточнении статистической и исторической информации о добыче золота в районе. Авторы обязаны им массой сэкономленного времени, за что выражают свою признательность.

Авторы выражают уважение профессионализму геологов Северной геолого-разведочной экспедиции Аверченкову А.И. и Бордоносову В.П., инициаторовавших в 1960-х гг. поисковые работы в Енашиминском районе, а также Курилину А.Я., являющемуся, вместе с Кругловым Г.П. и Ли Л.В., одним из первооткрывателей Олимпиадинского месторождения. В значительной степени благодаря работе коллектива геологов ПГО «Красноярскгеология» (Лопатина В.А., Арефьевой В.И., Неволлина В.А. и др.) удалось уже на начальной стадии изучения Олимпиадинского месторождения установить уникальность этого нового для Енисейского края типа месторождения.

Необходимо отметить плодотворную роль специалистов ЦНИГРИ (Новожилова Ю.И., Гаврилова Н.Ф. и др.), института цветных металлов им. М.И. Калинина (Михеева В.Г., Звягиной Е.А.), которые одними из первых начали научно-исследовательские работы на месторождении и сыграли важную роль в изучении минералогии руд, петрографии месторождения и разработке технологии обогащения упорных сульфидных руд методом биоокисления.

Значительный вклад в организацию промышленного освоения месторождения внесли первый руководитель геологической службы компании «Полюс» Ю.М. Страгис, а также геологи А.А. Плеханов и С.И. Савушкина. Большая заслуга в создании в кратчайшие сроки в сложных природно-климатических и инфраструктурных условиях Енисейского края крупнейшего золотодобычного предприятия принадлежит организатору и первому руководителю компании «Полюс» Х.М. Совмену. Во многом благодаря В.К. Совмену был запущен комплекс биоокисления и начата планомерная разведка глубоких горизонтов Олимпиады.

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьева З.Б., Иванова Г.Ф., Румбо Л., Миклишанский А.З.** Геохимия РЗЭ в породах и минералах шеелитсодержащего золото-сульфидного месторождения Олимпиада (Енисейский край) // Геохимия. 1997. № 2. С. 189–201.
- Бернагонис П.В.** Зона окисления Олимпиадинского прожилково-вкрапленного золото-сульфидного месторождения : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1999. 19 с.
- Буряк В.А.** Метаморфизм и рудообразование: М. : Недра, 1982. 256 с.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е.** Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского края // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 1. С. 35–52.
- Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е., Матушкин Н.Ю., Казанский А.Ю., Кадильников П.И., Романова И.В., Вингейт М.Т.Д., Ларионов А.Н., Родионов Н.В.** Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского края и формирование западной окраины Сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 63–90.
- Винклер Г.** Генезис метаморфических пород. М. : Недра, 1979. 327 с.
- Волков А.В., Мурашов К.Ю., Сидоров А.А.** Геохимические особенности руд месторождения золота Наталкинское – крупнейшего на северо-востоке России // Доклады академии наук. 2016. Т. 466, № 5. С. 574–577.
- Врублевский В.В., Никитин Р.Н., Тишин П.А., Травин А.В.** Метабазитовые породы среднего Заангарья, Енисейский край: E-MORB реликты неопротерозойской литосферы // Литосфера. 2017. Т. 17, № 5. С. 67–84.
- Генкин А.Д., Лопатин В.А., Савельев Р.А., Сафонов Ю.Г., Сергеев Н.Б., Керзин А.Л., Цепин А.И., Амштутц Х., Афанасьева З.Б., Вагнер Ф., Иванова Г.Ф.** Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский край, Сибирь) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 2. С. 111–136.
- Генкин А.Д., Вагнер Ф.Е., Крылова Т.Л., Цепин А.И.** Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский край, Сибирь) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 1. С. 59–76.
- Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л.** Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 11. С. 1851–1867.
- Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак Т.А., Рябуха М.А., Сильянов С.А., Некрасова Н.А., Хоменко М.О., Шапаренко Е.О.** Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский край): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов, $3\text{He}/4\text{He}$ флюидов, Ag-Ag возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. 2019 (принята в печать).
- Гибшер Н.А., Рябуха М.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Хоменко М.О., Бульбак Т.А., Некрасова Н.А.** Характеристика металллоносных флюидов и возраст формирования золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С. 1721–1741.
- Григоров В.Т.** Крупнейшие золоторудные месторождения Енисейского края и Кузнецкого Алатау и их экономическая оценка с позиции стратиформного рудообразования. М. : Научный Мир, 2003. 168 с.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.В.** Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (северо-восток России) // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50, № 5. С. 414–444.
- Добрецов Н.Л.** Метаморфизм мезозойских и кайнозойских складчатых областей. Метаморфические комплексы Азии. Новосибирск : Наука, 1977. 221 с.
- Журавлев В.В.** Положение шарниров складок в структуре Олимпиадинского рудного поля и их рудоконтролирующее значение // Разведка и охрана недр. 2016. № 4. С. 21–26.
- Заири Н.М., Глухов А.П., Палкин И.И., Звягина Е.А.** Изотопно-геохимические характеристики зон золоторудной минерализации вкрапленного типа в карбонатных породах // ДАН СССР. 1986. Т. 290, № 4. С. 956–960.
- Звягина Е.А.** Метаморфизм и золотоносность Верхне-Енашименского рудного узла : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Красноярск, 1989. 275 с.
- Знаменский С.Е., Мичурин С.В., Велівецкая Т.А., Знаменская** Структурные условия формирования и возможные источники рудного вещества Ганеевского месторождения золота (Южный Урал) // Литосфера. 2014. № 6. С. 118–131.
- Коробейников А.Ф., Апаньев Ю.С., Гусев А.И., Ворошилов В.Г., Номоконова Г.Г., Пшеничкин А.Я., Тимкин Т.В.** Рудно-метасоматическая и геохимическая зональность золоторудных полей и месторождений складчатых поясов Сибири. Томск, 2013. 458 с.
- Кряжев С.Г.** Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2017. 288 с.
- Кучеренко И.В.** Петролого-геохимические свидетельства геолого-генетической однородности гидротермальных месторождений золота, образованных в черносланцевом и несланцевом субстрате // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311, № 1. С. 25–35.
- Ли Л.В., Круглов Г.П. и др.** Роль литологических и структурных факторов в локализации прожилково-вкрапленного оруднения в надинтрузивной зоне // Геология рудных месторождений. 1984. № 1. С. 83–88.
- Ли Л.В.** Олимпиадинское месторождение вкрапленных золото-сульфидных руд. Красноярск, КНИИГиМС, 2003. 120 с.
- Легенда** Енисейской серии Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е изд. / гл. ред. Л.К. Качевский. Красноярск : Красноярскгеолсъемка, 2002. 16 с.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Вершинин А.Е.** Геохимические свидетельства природы протолита железисто-глиноземистых метапелитов кузнецкого Алатау и Енисейского края // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 1. С. 119–131.
- Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С.** Гренвилльские тектонические события и эволюция Енисейского края, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48, № 5. С. 116–137.
- Николаева Л.А.** Газовые включения в самородном золоте // Записки ВМО. 1954. Т. 83, № 4. С. 401–402.
- Новожиллов Ю.И., Стороженко А.А., Гаврилов А.М., Яблокова С.В., Варгунина Н.П., Шерман М.Л., Лопатин В.А., Арефьева В.И.** Олимпиадинское месторождение. Золоторудные месторождения СССР. М., 1986. Т. 3. С. 126–146.

- Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М.** Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. Месторождение Олимпиадинское. М. : ЦНИГРИ, 1999. 175 с.
- Новожилов Ю.И., Гаврилов А.М., Яблокова С.В., Арефьева В.И.** Уникальное промышленное золото-сульфидное месторождение Олимпиада в верхнепротерозойских терригенных отложениях // Руды и металлы. 2014. № 3. С. 51–64.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Маслов А.В., Дмитриева Н.В., Ковач В.П., Ронкин Ю.Л.** Sm-Nd-изотопная систематика метapelитов докембрия Енисейского края и вариации возраста источников сноса // Докл. РАН. 2008. Т. 423, № 6. С. 795–800.
- Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А.** Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского края // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 1. С. 158–181.
- Петров В.Г.** Условия золотоносности северной части Енисейского края. Новосибирск : Наука, 1974. 140 с.
- Петровская Н.В.** Самородное золото. М. : Наука, 1973. 331 с.
- Полева Т.В., Сазонов А.М.** Геология золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском крае. М. : Экономическая газета, 2012. 290 с.
- Рябчиков И.Д., Новгородова М.Н.** Восстановленные флюиды в гидротермальном рудообразовании // ДАН СССР. 1981. Т. 258, № 6. С. 1453–1456.
- Савичев А.А., Гавриленко В.В.** Золото-сульфидное оруденение Северо-Енисейского района (Сибирь) и условия его формирования // Зап. ВМО. 2003. № 2. С. 15–32.
- Савичев А.А.** Минералого-геохимическая зональность и условия формирования Au-Sb-W минерализации Верхне-Енашиминского рудного узла (Енисейский край) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2004. 44 с.
- Савичев А.А., Шевченко С.С., Розинов М.И. и др.** Изотопно-геохимическая характеристика золото-сульфидного месторождения Олимпиада и его сателлитов (Енисейский край) // Региональная геология и металлогения. 2006. № 26. С. 122–143.
- Сазонов А.М.** Геохимия золота в метаморфических толщах. Томск : ТПУ, 1998. 166 с.
- Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И.** Золоторудная металлогения Енисейского края: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2010. Т. 3, № 4. С. 371–395.
- Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Федорова А.В., Гавриленко В.В., Звягина Е.А., Леонтьев С.И.** Заангарский щелочной интрузив, Енисейский край: Rb-Sr-, Sm-Nd-изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии // Доклады академии наук. 2007. Т. 413. № 6. С. 798–802.
- Сазонов А.М., Кирик С.Д., Сильянов С.А., Баюков О.А., Тишин П.А.** Типоморфизм арсенопирита золоторудных месторождений Благодатное и Олимпиада (Енисейский край) // Минералогия. 2016. № 3. С. 53–70.
- Сараев В.А., Сазонов А.М.** Вихревая система Енисейского края. ВИНТИ № 2150-78, ДЕП.
- Сердюк С.С., Коморовский Ю.Е., Зверев А.И., Оябрь В.К., Власов В.С., Бабушкин В.Е., Кириленко В.А., Землянский С.А.** Модели месторождений золота Енисейской Сибири. Красноярск : Изд-во СФУ, Институт горного дела, геологии и геотехнологий (ИГДГиГ), 2010. 582 с.
- Совмен В.К., Страгис Ю.М., Плеханов А.А., Бибики С.М., Кривякова Л.П., Савушкина С.И., Лохмаков В.А., Звездин И.Г., Логачев В.С.** Геологическое строение золоторудных месторождений и опыт геологического обслуживания сырьевой базы Компании «Полус» в Красноярском крае. Красноярск : Версо, 2009. 208 с.
- Стороженко А.А., Васильев Н.Ф., Динер А.Э. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Сер. Енисейская. Лист О-46-III. Объяснительная записка. Москва (Санкт-Петербург), 2002.
- Томиленко А.А., Гибшер Н.А.** Особенности состава флюидов в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия. 2001. № 2. С. 167–177.
- Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Козьменко О.А., Палесский С.В., Николаева И.В.** Лантаноиды во флюидных включениях, кварце и зеленых сланцах из золотоносных и безрудных кварцево-жильных зон Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский край, Россия // Геохимия. 2008. № 4. С. 438–444.
- Федорова А.В., Сазонов А.М.** Петрология ийолит-фойяитовой интрузии в Енисейском крае. М. : Экономическая газета, 2012. 172 с.
- Шенфильд В.Ю.** Поздний кембрий Сибирской платформы. Новосибирск : Наука, 1991. 185 с.
- Яблокова С.В., Коновалова М.С., Сандомирская С.М.** Минералогия золотоносной коры выветривания на месторождении прожилково-вкрапленных сульфидных руд в терригенно-карбонатных толщах докембрия // Тр. ЦНИГРИ. 1986. № 208. С. 10–19.
- Borikovo A.S., Sazonov A.M., Nevolko P.A., Naumov E.A., Tessalina S., Kovalev K.R., Sukhorukov V.P.** Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation // Acta Geologica Sinica. 2014. V. 88 (2). P. 686–687.
- Gizé A.F.** Organic alteration in hydrothermal sulfide ore deposits // Econ. Geol. 1999. V. 94. P. 967–980.
- Henry D., Guidotti C., Thomson J.** The Ti-Saturation Surface for Low-to-Medium Pressure Metapelitic Biotites: Implications for Geothermometry and Ti-Substitution Mechanism // American Mineralogist. 2005. V. 90. P. 316–328.
- Holdaway M.J.** Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer // American Mineralogist. 2000. V. 85. P. 881–892.
- Kretschmar U., Scott S.D.** Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // Can. Mineral. 1976. V. 14. P. 364–386.
- Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T.** Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeast Guizhou Province, China // Chin. J. Geochem. 2014. V. 33. P. 109–118.
- Lambert J.M., Simkovich G., Walker P.L.** The kinetics and mechanism of the pyrite-to-pyrrhotite transformation // Metallurgical and materials transformations B. 1998. V. 29B. P. 951–963.
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sukhorukov V.P., Kozlov P.S., Khiller V.V.** Three metamorphic events in the Precambrian P-T-t history of the Transangarian Yenisey ridge recorded in garnet grains in metapelites // Petrology. 2013. V. 21 (6). P. 561–578.
- Migdisov A.A., Guo X., Xu H., Williams-Jones A.S., Sun C.J., Vasyukova O., Sugiyama I., Fuchs S., Pearce K., Roback R.** Hydrocarbons as ore fluids // Geochemical Perspectives Letters. 2017. V. 5. P. 47–52.
- Monecke T., Kempe U., Monecke J., Sals M., Wolf D.** Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. V. 66 (7). P. 1185–1196.

Naumov E.A., Borisenko A.S., Nevolko P.A., Kovalev K.R., Tessalina S., Sazonov A.M., Savichev A.A., Zvyagina E.A. Gold-sulfide (Au-As) Deposits of the Yenisei Ridge (Russia): Age, Sources of Metals and Nature of Fluids // Proceeding of the 13 Biennial SGA Meeting. 2015. P. 165–168.

Scott S.D. Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments // *Min. Mag.* 1983. V. 47. P. 427–435.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // *Econ. Geol.* 2010. V. 105. P. 375–394.

Toulmin P., Barton P.B. A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 1964. V. 288. P. 641–671.

Wu C.M., Zhang J., Ren L.D. Empirical garnet – biotite – plagioclase – quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grade metapelites // *Journal of Petrology.* 2004. V. 45. P. 1907–1921.

Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // *Ore Geology Reviews.* 2014. V. 59. P. 21–28.

Авторы:

Сазонов Анатолий Максимович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии, минералогии и петрографии ИГДГиГ СФУ, Красноярск, Россия. E-mail: sazonov_am@mail.ru

Звягина Елена Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии, минералогии и петрографии ИГДГиГ СФУ, Красноярск, Россия. E-mail: elena_zv@mail.ru

Сильянов Сергей Анатольевич, ведущий инженер, ассистент, кафедра геологии, минералогии и петрографии ИГДГиГ СФУ, инженер R&D центра НорНикель ИГДГиГ СФУ, Красноярск, Россия. E-mail: silyanov-s@mail.ru, т. 89631889156

Лобанов Константин Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра геологии месторождений и методики разведки, МПИ ИГДГиГ СФУ, Красноярск, Россия. E-mail: klobanov@yandex.ru

Леонтьев Сергей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геологии, минералогии и петрографии, ИГДГиГ СФУ, Красноярск, Россия. E-mail: sleontyev2016@mail.ru

Калинин Юрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория прогнозно-металлогенетических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: kalinin@igm.nsc.ru

Савичев Андрей Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет; главный специалист управления исследований и развития ООО «Норильскгеология», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a_savichev@mail.ru

Тишин Платон Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, и.о. декана ГГФ ТГУ, Томск, Россия. E-mail: tishin_pa@mail.ru

Geosphere Research, 2019, 1, 17–43. DOI: 10.17223/25421379/10/2

**A.M. Sazonov¹, Ye.A. Zvyagina¹, S.A. Silyanov¹, K.V. Lobanov¹, S.I. Leontyev¹,
Yu.A. Kalinin², A.A. Savichev^{3,4}, P.A. Tishin⁵**

¹ *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

² *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

³ *Saint-Petersburg Mining University, St Petersburg, Russia*

⁴ *LLC «Norilskgeology»*

⁵ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

ORE GENESIS OF THE OLIMPIADA GOLD DEPOSIT (RUSSIA, YENISEI RIDGE)

The Olimpiada gold-sulfide deposit in the Yenisei Ridge, as per the results of additional exploration of the recent years, has confirmed its uniqueness in terms of reserves (1560 t) and ore extent in the depth (1500 m). Meanwhile, no indicators of thinning out and change in mineralization parameters have been noted. Oxidized ores mined out to date were developed in the upper part of the deposit. About 200 t of metal have been mined from them. The deposit is confined to the silicate and carbonate band of the Lower Riphean Kordinskaya suite clastic stratum. Granitoids separated from the deposit at 1.5 km and above surround the deposit. Introduction of intrusions in the Tatar-Ishimbinskaya tectonic zone assisted in the formation of compensation synformal depressions (Innokent'yevskaya and Chirimbinskaya synclines) in the contact zones of intrusions united by the antiformal rock unit (Medvezhinskaya anticline). These connected W-shaped structural elements represent the structure of the ore field. Subhorizontal shifts in the area shaped the magmatogene structure into tectonic syncline and anticline folds. The ore bodies are concentrated in fold curves and rock bends at limbs. The northeastern curve of the Medvezhinskaya anticline has the highest ore content. There, the deposits of the northern and southeastern limbs of the Medvezhinskaya antiform are connected and represent a single ore body sloping to the southeast. No indicators of thinning out at the depth have been revealed.

The micaceous-quartz-carbonate matrix of the sulfide-disseminated ores has been boudinaged, milonite-altered and folded into minor folds up to plication. The main ore forming elements, including Au, Ag, Fe and Sb, form dissemination of native minerals, sulfides, sulfosalts and tellurides. In terms of the mineralogical and geochemical composition the ores are divided into gold-arsenic and gold-arsenic-antimony ores separated spatially. The gold-arsenic-antimony ores with the geochemical mercury and tellurium impurity are confined to the northeastern deposit of the ore body. Metamorphism in the tectonic-metamorphic zone of the deposit occurred at the temperature of 400–420°C and the pressure of 3–4 kbar in chlorite and biotite zones, and in the garnet and margarite zone – at 580–605°C and the pressure of 7.2–7.5 kbar. Metasomatism of silicate and carbonate rocks with skarnoid formation (Act+CZo+Gar+Sph) occurred at 320–480°C and the pressure of 1.3–1.5 kbar, and of acidic metasomatites (silicified and sericitized rocks) at T = 290–380°C and P = 1.0–3.0 kbar. The polystage hydrothermal quartz-gold-sulfide process of aggregate formation occurred in the interval of 460–110°C. The age of the main stages of ore formation is within 817–660 Ma. The industrial ores of gold-arsenic composition have the age of 758–803 Ma, and the gold-arsenic-antimony ores are 660–795 Ma old. The isotope and geochemical studies testify to the participa-

tion of the crust and mantle substance in the deposit formation. Aquatic-chloride-carbon dioxide solutions saturated with hydrocarbons participated in the ore substance transportation.

Keywords: *Yenisei Ridge, Olimpiada gold deposit, hosting rocks, structure, ore composition, genesis.*

References

- Afanas'eva Z.B., Ivanova G.F., Raimbault L., Miklishanskii A.Z.** Rare-Earth Geochemistry of Rocks and Minerals from the Olimpiada Scheelite-bearing Gold Sulfide Deposit, Yenisei Ridge, Russia // *Geochemistry International*. 1997. V. 2. pp. 189–201.
- Bernatonis P.V.** *Zona okisleniya Olimpiadinskogo prozhil'kovno-vkraplennogo zoloto-sul'fidnogo mestorozhdeniya* [The oxidation zone of the Olimpiada vein-impregnated gold-sulphide deposit]: Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk. Tomsk, 1999. 19 p. In Russian
- Buryak V.A.** *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]: Moscow : «Nedra», 1982. 256 p. In Russian
- Vepnikovskij V.A., Vepnikovckaya A.E.** *Tektonika i e'voluciya gpanitoidnogo magmatizma Enisejskogo kryazha* [Tectonics and evolution of granitoid magmatism of the Yenisei Ridge] // *Geologiya i geofizika*. 2006. V. 47. № 1. pp. 35–52. In Russian
- Vernikovskiy V.A., Metelkin D.V., Vernikovskaya A.E., Matushkin N.Y., Kadilnikov P.I., Romanova I.V., Kazansky A.Y., Wingate M.T.D., Larionov A.N., Rodionov N.V.** Neoproterozoic tectonic structure of the Yenisei ridge and formation of the western margin of the Siberian craton based on new geological, paleomagnetic, and geochronological data // *Russian geology and geophysics*. 2016. V. 57. № 1. pp. 47–68.
- Vinkler G.** *Genesis metamorficheskix porod* [The genesis of metamorphic rocks]: Moscow : Nedra, 1979. 327 p. In Russian
- Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A.** Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in Northeastern Russia // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. pp. 161–164.
- Vrublevskij V.V., Nikitin R.N., Tishin P.A., Travin A.V.** *Metabazitovy'e porody` srednego Zaangar'ya, Enisejskij kryazh: E-MORB relikty` neoproterozojskoj litosfery`* [Metabasites of Middle Transangaria, Yenisei Ridge: E-MORB relicts of Neoproterozoic lithosphere] // *Litosfera*. 2017. V. 17. № 5. pp. 67–84. In Russian
- Genkin A.D., Lopatin V.A., Savel'ev R.A., Safonov Yu.G., Sergeev N.B., Kerzin A.L., Cepin A.I., Amshtutz X., Afanas'eva Z.B., Vagner F., Ivanova G.F.** *Zoloty'e rudy` mestorozhdeniya Olimpiada (Enisejskij kryazh, Sibir')* [Gold Ores from the Olympiad Deposit (Yenisei Ridge, Siberia)] // *Geologiya rudny'x mestorozhdenij*. 1994. V. 36. № 2. pp. 111–136. In Russian
- Genkin A.D., Wagner F.E., Krylova T.L., Tsepin A.I.** Gold-bearing arsenopyrite and its formation condition at the Olimpiada and Veduga gold deposits (Yenisei range, Siberia) // *Geology of Ore Deposits*. 2002. V. 44. № 1. pp. 52–68.
- Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Ryabukha M.A., Timkina A.L., Sazonov A.M.** The Gerfed gold deposit: Fluids and PT-conditions for quartz vein formation (Yenisei Ridge, Russia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52. № 11. pp. 1461–1473.
- Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Bul'bak T.A., Ryabuxa M.A., Sil'yanov S.A., Nekrasova N.A., Xomenko M.O., Shaparenko E.O.** Olimpiada gold deposit (Yenisei ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, $\delta^{34}\text{S}$ sulfides, $^3\text{He}/^4\text{He}$ fluids, Ar-Ar age and duration of formation // *Russian Geology and Geophysics*. 2019 (In Press)
- Gibsher N.A., Ryabukha M.A., Tomilenko A.A., Khomenko M.O., Bul'bak T.A., Sazonov A.M., Nekrasova N.A.** Metal-bearing fluids and the age of the Panimba gold deposit (Yenisei Ridge, Russia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. V. 58. № 11. pp. 1366–1383.
- Grigorov V.T.** *Krupnejshie zolotorudny'e mestorozhdeniya Enisejskogo kryazha i Kuzneczkogo Alatau i ix e'konomicheskaya ocenka s pozicii stratiformnogo rudoobrazovaniya* [The largest gold deposits of the Yenisei Ridge and the Kuznetsk Alatau and their economic assessment from the standpoint of stratiform ore formation]: Moscow : «Nauchny'j Mir», 2003. 168 p. In Russian
- Goryachev N.A., Golub V.V., Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S., Prokof'ev V.Yu., Alpatov V.A.** The world-class Natalka gold deposit, northeast Russia: REE patterns, fluid inclusions, stable oxygen isotopes, and formation conditions of ore // *Geology of Ore Deposits*. 2008. V. 50. № 5. pp. 362–390.
- Dobreczov N.L.** *Metamorfizm mezozojskix i kajnozojskix skladchaty'x oblastej. Metamorficheskie komplekсы` Azii* [Metamorphism of Mesozoic and Cenozoic folded regions. Metamorphic complexes of Asia]: Novosibirsk: «Nauka», 1977. 221 p. In Russian
- Zhuravlev V.V.** *Polozhenie sharnirov skladok v strukture Olimpiadinskogo rudnogo polya i ix rudokontroliruyushhee znachenie* [On the finding of fold hinges in a structure of the Olimpiada gold ore field and their part in ore control] // *Razvedka i ohrana nedr*. 2016. № 4. pp. 21–26. In Russian
- Zairi N.M., Gluxov A.P., Palkin I.I., Zvyagina E.A.** *Izotopno-geoximicheskie xarakteristiki zon zolotorudnoj mineralizacii vkraplennogo tipa v karbonatny'x porodax* [Isotope-geochemical characteristics of the zones of gold ore mineralization interspersed in carbonate rocks] // *DAN SSSR*. 1986. V. 290. № 4. pp. 956–960. In Russian
- Zvyagina E.A.** *Metamorfizm i zolotonosnost` Verxne-Enashimenskogo rudnogo uzla* [Metamorphism and gold content of the Upper Enashimi ore cluster]: Dis. kand. geol.-min. Nauk. Krasnoyarsk, 1989. 275 p. In Russian
- Znamensky S.E., Michurin S.V., Velivetskaya T.A., Znamenskaya N.M.** *Strukturnye usloviya formirovaniya i vozmozhnye istochniki rudnogo veshchestva Ganeevskogo mestorozhdeniya zolota (Yuzhnyy Ural)* [Structural conditions of formation and ore material sources of the Ganeevka gold deposit (Southern Ural)] // *Litosfera*. 2014. № 6. p. 118–131. In Russian
- Korobejnikov A.F., Anan'ev Yu.S., Gusev A.I., Voroshilov V.G., Nomokonova G.G., Pshenichkin A.Ya., Timkin T.V.** *Rudno-metasomaticheskaya i geoximicheskaya zonal'nost` zolotorudny'x polej i mestorozhdenij skladchaty'x poyasov Sibiri* [Ore-metasomatic and geochemical zonality of gold fields and deposits of the folded belts of Siberia]: Tomsk, 2013. 458 p. In Russian
- Kryazhev S.G.** *Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudny'x mestorozhdenij v uglerodisto-terrigenny'x kompleksax* [Genetic models and criteria for the prediction of gold deposits in carbon-terrigenous complexes]: Dis. dokt. geol.-min. nauk. Moscow, 2017. 288 p. In Russian
- Kucherenko I.V.** *Petrologo-geoximicheskie svidetel'stva geologo-geneticheskoy odnorodnosti gidrotermal'ny'x mestorozhdenij zolota, obrazovanny'x v chernoslancevom i neslancevom substrate* [Petrol-geochemical evidence of geological and genetic homogeneity of hydrothermal gold deposits formed in the black shale and non shale substrates] // *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2007. V. 311. № 1. pp. 25–35. In Russian
- Li L.V., Kruglov G.P. i dr.** *Rol' litologicheskix i strukturny'x faktorov v lokalizacii prozhil'kovno-vkraplennogo orudneniya v nadintruzivnoj zone* [The role of lithologic and structural factors in the localization of vein-impregnated mineralization in the superintrusive zone] // *Geologiya rudny'x mestorozhdenij*. 1984. № 1. pp. 83–88. In Russian

- Li L.V.** *Olimpiadinskoe mestorozhdenie vkraplenny'x zoloto-sul'fidny'x rud* [Olympiada deposit of disseminated gold-sulphide ores]: Krasnoyarsk, KNIIGiMS, 2003. 120 p. In Russian
- Legenda Enisejskoj serii Gosudarstvennoj geologicheskoy karty Rossijskoj federacii masshtaba 1:200 000. 2-e izd. [The legend of the Yenisei series of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000. 2nd ed.] // gl. red. Kachevskij L.K. Krasnoyarsk: Krasnoyarskgeols'emka, 2002. 16 p. In Russian
- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Vershinin A.E.** Geochemical evidences for protolith origin of Fe-and Al-rich metapelites from Kuznetsk Alatau and Yenisey Ridge // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47. № 1. pp. 120-133.
- Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Kozlov P.S.** Grenville tectonic events and evolution of the Yenisei Ridge at the western margin of the Siberian Craton // Geotectonics. 2014. V. 48. № 5. pp. 371-389.
- Nikolaeva L.A.** *Gazovy'e vkladyeniya v samorodnom zolote* [Gas inclusions in native gold] // Zap. VMO. 1954. V. 83. № 4. pp. 401-402. In Russian
- Novozhilov Yu.I., Storozhenko A.A., Gavrilov A.M., Yablokova S.V., Vargunina N.P., Sherman M.L., Lopatin V.A., Aref'eva V.I.** *Olimpiadinskoe mestorozhdenie. Zolotorudny'e mestorozhdeniya SSSR* [Olympiada field. Gold deposits of the USSR]: Moscow, 1986. V. 3. pp. 126-146. In Russian
- Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M.** *Zoloto-sul'fidny'e mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigeny'x tolshhax. Mestorozhdenie Olimpiadinskoe* [Gold-sulphide deposits in carbon-terrigenous strata. Olimpiadinskoye deposit]: Moscow : «CzNIGRI», 1999. 175 p. In Russian
- Novozhilov Yu.I., Gavrilov A.M., Yablokova S.V., Aref'eva V.I.** *Unikal'noe promy'shlennoe zoloto-sul'fidnoe mestorozhdenie Olimpiada v verxneproterozojksix terrigeny'x otlozheniyax* [The unique industrial gold-sulphide deposit of the Olympiad in Upper Proterozoic terrigenous sediments] // Rudy i metally. 2014. № 3. pp. 51-64. In Russian
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Dmitrieva N.V., Kovach V.P., Maslov A.V., Ronkin Y.L.** Sm-nd isotopic systematics of precambrian metapelites from the yenisei range and age variations of their provenances // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 423. № 2. pp. 1495-1500.
- Nozhkin A.D., Borisenko A.S., Nevol'ko P.A.** Stages of Late Proterozoic magmatism and periods of Au mineralization in the Yenisei Ridge // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52. № 1. pp. 124-143.
- Petrov V.G.** *Usloviya zolotonosnosti severnoj chasti Enisejskogo kryazha* [Gold conditions in the northern part of the Yenisei Ridge]: Novosibirsk: «Nauka», 1974. 140 p. In Russian
- Petrovskaya N.V.** *Samorodnoe zoloto* [Native gold]: Moscow : «Nauka», 1973. 331 p. In Russian
- Poleva T.V., Sazonov A.M.** *Geologiya zolotorudnogo mestorozhdeniya Blagodatnoe v Enisejskom kryazhe* [Geology of the Blagodatnoe gold deposit in the Yenisei Ridge]: M.: Izdatel'skij dom «E'konomicheskaya gazeta», 2012. 290 p. In Russian
- Ryabchikov I.D., Novgorodova M.N.** *Vosstanovlennyye flyuidy v gidrotermal'nom rudoobrazovanii* [Reduced fluids in hydrothermal ore formation] // DAN SSSR. 1981. V. 258. № 6. pp. 1453-1456. In Russian
- Savichev A.A., Gavrilenko V.V.** *Zoloto-sul'fidnoe orudnenie Severo-Enisejskogo rajona (Sibir') i usloviya ego formirovaniya* [Gold-sulphide mineralization of the North-Yenisei region (Siberia) and the conditions of its formation] // Zap. VMO. 2003. № 2. pp. 15-32. In Russian
- Savichev A.A.** *Mineralogo-geoximicheskaya zonal'nost' i usloviya formirovaniya Au-Sb-W mineralizacii Verxne-Enashiminskogo rudnogo uzla (Enisejskij kryazh)* [Mineralogical and geochemical zonality and conditions for the formation of Au-Sb-W mineralization of the Upper Enashima ore cluster (Yenisei Ridge)]: Avtoref. dis. kand. geol.-min. nauk. St-Petersburg. 2004, 44 p. In Russian
- Savichev A.A., Shevchenko S.S., Rozinov M.I. i dr.** *Izotopno-geoximicheskaya xarakteristika zoloto-sul'fidnogo mestorozhdeniya Olimpiada i ego satellitov (Enisejskij kryazh)* [Isotopic-geochemical characteristics of the gold-sulphide deposit of the Olympiad and its satellites (Yenisei Ridge)] // Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2006. № 26. pp. 122-143. In Russian
- Sazonov A.M.** *Geoximiya zolota v metamorficheskix tolshhax* [Geochemistry of gold in metamorphic strata]: Tomsk: «TPU», 1998. 166 p. In Russian
- Sazonov A.M., Anan'ev A.A., Poleva T.V., Xoxlov A.N., Vlasov V.S., Zvyagina E.A., Fedorova A.V., Tishin P.A., Leont'ev S.I.** *Zolotorudnaya metallogeniya Enisejskogo kryazha: geologo-strukturnaya pozitsiya, strukturnyye tipy rudny'x polej* [Gold-ore Metallogeny of the Yenisey Ridge: Geological-Structural Province, Structural Types of ore Fields] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo un-ta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. 2010. V. 3. № 4. pp. 371-395. In Russian
- Sazonov A.M., Vrublevsky V.V., Gertner I.F., Fedorova A.V., Gavrilenko V.V., Zvyagina E.A., Leont'ev S.I.** The Transangara alkaline Pluton, Yenisei Range: Rb-Sr and Sm-Nd isotope ages and sources of feldspathoid magmas in Late Precambrian // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 413. № 3. pp. 469-473.
- Sazonov A.M., Kirik S.D., Sil'yanov S.A., Bayukov O.A., Tishin P.A.** *Tipomorfizm arsenopirita zolotorudny'x mestorozhdenij Blagodatnoe i Olimpiada (Enisejskij kryazh)* [Typomorphism of arsenopyrite gold deposits Blagodatnoe and Olympiad (Yenisei Ridge)] // Mineralogiya. 2016. № 3. pp. 53-70. In Russian
- Saraev V.A., Sazonov A.M.** *Vixrevaya sistema Enisejskogo kryazha* [Vortex system of the Yenisei Ridge]. VINITI № 2150-78, DEP. In Russian
- Serdyuk S.S., Komorovskij Yu.E., Zverev A.I., Oyaber' V.K., Vlasov V.S., Babushkin V.E., Kirilenko V.A., Zemlyanskij S.A.** *Modeli mestorozhdenij zolota Enisejskoj Sibiri: Krasnoyarsk* [Models of gold deposits of Yenisei Siberia]: «Izd-vo SFU, Institut gornogo dela, geologii i geotekhnologii (IGDGiG)», 2010. 582 p. In Russian
- Sovmen V.K., Stragis Yu. M., Plexanov A.A., Bibik S.M., Krovyakova L.P., Savushkina S.I., Loxmakov V.A., Zvezdin I.G., Logachev V.S.** *Geologicheskoe stroenie zolotorudny'x mestorozhdenij i opy't geologicheskogo obsluzhivaniya sy'r'evoy bazy Kompanii «Polyus» v Krasnoyarskom krae* [The geological structure of gold deposits and the experience of geological services for the raw material base of the Polyus Company in the Krasnoyarsk Territory]: Krasnoyarsk: «Verso», 2009. 208 p. In Russian
- Storozhenko A.A., Vasil'ev N.F., Diner A.E' i dr.** *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000. Izdanie vtoroe. Seriya Enisejskaya. List O-46-III. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation in scale 1: 200 000. Second edition. Series Yenisei. Sheet O-46-III. Explanatory note]: Moscow (St-Petersburg) 2002. In Russian
- Tomilenko A.A., Gibsher N.A.** Peculiarities of Fluid Composition in the Mineralized and Barren Zones of the Sovetskoe Quartz-Gold Deposit, Yenisei Mountain Range Based on Fluid Inclusion Study // Geochemistry International. 2001. № 2. pp. 167-177.
- Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Koz'menko O.A., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V.** Lanthanides in fluid inclusions, quartz, and greenschists from auriferous and barren quartz-vein zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit, Yenisei Range, Russia // Geochemistry International. 2008. V. 46. № 4. pp. 402-408.

Fedorova A.V., Sazonov A.M. *Petrologiya ijolit-fojyaitovoj intruzii v Enisejskom kryazhe* [Petrology of Iyolite-Foyit intrusion in the Yenisei Ridge]: Moscow : Izdatel'skiy dom «E'konomicheskaya gazeta», 2012. 172 p. In Russian

Shenfil' V.Yu. *Pozdnij kembrij Sibirskoj platformy* [Late Cambrian of the Siberian Platform]: Novosibirsk: «Nauka», 1991, 185 p. In Russian

Yablokova S.V., Konovalova M.S., Sandomirskaya S.M. *Mineralogiya zolotonosnoj kory` vy`vetrivaniya na mestorozhdenii prozhilkovo-vkraplenny`x sul'fidny`x rud v terrigenno-karbonatny`x tolshhax dokembriya* [Mineralogy of the gold-bearing weathering crust at the vein-impregnated sulphide ore deposit in Precambrian terrigenous-carbonate strata] // Tr. CzNIGRI. 1986. № 208. pp. 10–19. In Russian

Borisenko A.S., Sazonov A.M., Nevolko P.A., Naumov E.A., Tessalina S., Kovalev K.R., Sukhorukov V.P. Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation // Acta Geologica Sinica. 2014. V. 88(2). P. 686–687.

Giz'e A.F. Organic alteration in hydrothermal sulfide ore deposits // Econ. Geol. 1999, V. 94. P. 967–980.

Henry, D., Guidotti, C., Thomson, J. The Ti-Saturation Surface for Low-to-Medium Pressure Metapelitic Biotites: Implications for Geothermometry and Ti-Substitution Mechanism // American Mineralogist. 2005. V. 90. P. 316–328.

Holdaway, M. J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer // American Mineralogist. 2000. V. 85. P. 881–892.

Kretschmar, U., Scott, S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // Can. Mineral. 1976. V. 14. P. 364–386.

Kun L., Ruidong Y., Wenyong C., Rui L., Ping T. Trace element and REE geochemistry of the Zhewang gold deposit, southeastern Guizhou Province, China // Chin. J. Geochem. 2014. V. 33. P. 109–118.

Lambert J.M., Simkovich G., Walker P.L. The kinetics and mechanism of the pyrite-to-pyrrhotite transformation // Metallurgical and materials transformations B. 1998. V. 29B. P. 951–963.

Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Sukhorukov V.P., Kozlov P.S., Khiller V.V. Three metamorphic events in the precambrian P-T-t history of the Transangarian Yenisei ridge recorded in garnet grains in metapelites // Petrology. 2013. V. 21(6). P. 561–578.

Migdisov A.A., Guo X., Xu H., Williams-Jones A.S., Sun C.J., Vasyukova O., Sugiyama I., Fuchs S., Pearce K., Roback R. Hydrocarbons as ore fluids // Geochemical Perspectives Letters. 2017. V. 5. P. 47–52.

Monecke T., Kempe U., Monecke J., Sals M., Wolf D. Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. V. 66(7). P. 1185–1196.

Naumov E.A., Borisenko A.S., Nevolko P.A., Kovalev K.R., Tessalina S., Sazonov A.M., Savichev A.A., Zvyagina E.A. Gold-sulfide (Au-As) Deposits of the Yenisei Ridge (Russia): Age, Sources of Metals and Nature of Fluids // Proceeding of the 13 Biennial SGA Meeting. 2015. P. 165–168.

Scott S.D. Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments // Min. Mag. 1983. V. 47. P. 427–435.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // Econ. Geol. 2010. V. 105. P. 375–394.

Toulmin P., Barton P.B. A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1964. V. 288. P. 641–671.

Wu C.M., Zhang J., Ren L.D. Empirical garnet – biotite – plagioclase – quartz (GBPQ) geobarometry in medium to high-grade metapelites // Journal of Petrology. 2004. V. 45. P. 1907–1921.

Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // Ore Geology Reviews. 2014. V. 59. P. 21–28.

Authors:

Sazonov Anatoly Maksimovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Department for Geology, Mineralogy and Petrography, Institute for Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: sazonov_am@mail.ru

Zvyagina Yelena Aleksandrovna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), professor of the Department for Geology, Mineralogy and Petrography, Institute for Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: elena_zv@mail.ru

Silyanov Sergey Anatolyevich, Lead Engineer, Assistant, Department for Geology, Mineralogy and Petrography, Institute for Mining, Geology and Geotechnology, Engineer, Norilsk Nickel R&D center, Institute for Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: silyanov-s@mail.ru

Lobanov Konstantin V., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Assistant Professor, Department of Geology of Deposits and Methods of Exploration, Ministry of Mineral Resources, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: klobanov@yandex.ru

Leontyev Sergey Iv., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Department for Geology, Mineralogy and Petrography, Institute for Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: sleontyev2016@mail.ru

Kalinin Yuri A., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Laboratory of Forecasting Metallogenic Studies, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: kalinin@igm.nsc.ru

Savichev Andrey A., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Assistant Professor, Saint-Petersburg Mining University; Chief Specialist, Office of Research and Development LLC «Norilskgeology», St Petersburg, Russia. E-mail: a_savichev@mail.ru

Tishin Platon A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Acting Dean, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: tishin_pa@mail.ru