

УДК 552.4:553.411(571.51)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_96_46-70

В. В. Шатов, С. В. Кашин, В. Н. Белова,
Е. Н. Афанасьева, В. А. Михайлов (*Институт Карпинского*)

ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ И МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОЛИМПИАДИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ): НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИХ СОСТАВЕ, МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ

В статье приводятся результаты минералого-петрографических и геохимических исследований гидротермально-метасоматических и метаморфических образований Олимпиадинского месторождения. Показано, что сочетание ореолов березитизации, контролирующих размещение в пространстве стратиформной золото-сульфидной минерализации с близкими им по морфологии мультипликативными положительными геохимическими аномалиями Au-As-Te-Sb-Hg состава может быть использовано в качестве гидротермально-метасоматических и геохимических критериев прогнозирования золото-сульфидной рудной минерализации на территории Олимпиадинского рудного поля. Обсуждается геолого-генетическая модель формирования Олимпиадинского месторождения. Даются рекомендации по направлению дальнейших работ по использованию данной методики в прогнозно-поисковых целях.

Ключевые слова: Олимпиадинское месторождение, березиты, стратиформная золото-сульфидная минерализация, критерии прогноза золотого оруденения, Енисейский кряж.

V. V. Shatov, S. V. Kashin, V. N. Belova,
E. N. Afanasieva, V. A. Mikhailov (*Karpinsky Institute*)

HYDROTHERMALLY ALTERED AND METAMORPHIC FORMATIONS OF THE OLYMPIADA GOLD DEPOSIT (YENISEI RIDGE): NEW DATA ON THEIR COMPOSITION, MINERALOGICAL, PETROGRAPHIC, AND GEOCHEMICAL FEATURES

The article presents the results of mineralogical, petrographic, and geochemical studies of hydrothermally altered and metamorphic formations of the Olympiada deposit. It shows that the combination of beresitization halos, which control the distribution of stratiform gold-sulphide mineralization in space, with multiplicative positive geochemical anomalies of Au-As-Te-Sb-Hg composition close to them in morphology, can be used as hydrothermal alteration and geochemical criteria for predicting gold-sulphide mineralization in the Olympiada ore field. We discuss geological and genetic model of the Olympiada deposit formation, give recommendations on the use of this technique for predictive and prospecting purposes.

Keywords: Olympiada deposit, beresites, stratiform gold-sulphide mineralization, criteria for predicting gold mineralization, Yenisei Ridge.

Для цитирования: Шатов В. В. Гидротермально-метасоматические и метаморфические образования Олимпиадинского золоторудного месторождения (Енисейский кряж): новые данные об их составе, минералого-петрографических и геохимических особенностях / В. В. Шатов, С. В. Кашин, В. Н. Белова, Е. Н. Афанасьева, В. А. Михайлов // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 96. – С. 46–70. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_96_46-70

Олимпиадинское месторождение золота является одним из крупнейших в России по разведанным запасам и занимает первое место по объему добываемого металла. Оно находится на Енисейском кряже, который рассматривается как область байкальской складчатости [19] и представляет собой аккреционно-коллизийную структуру, слагающую мегантиклинорий, осложненный антиклинальными и синклинальными структурами более высоких порядков, разделенными крупными долго-

живущими разломами, главным образом северо-западного простирания (рис. 1).

В геологическом строении Енисейского кряжа выделяется несколько структурных этажей (ярусов) [2; 6; 10].

Нижний этаж представлен кристаллическим фундаментом Сибирской платформы: архейско-нижнепротерозойскими гранулитовыми и амфибол-гнейсовыми комплексами. Выше залегают сложнодислоцированные кристаллические сланцы

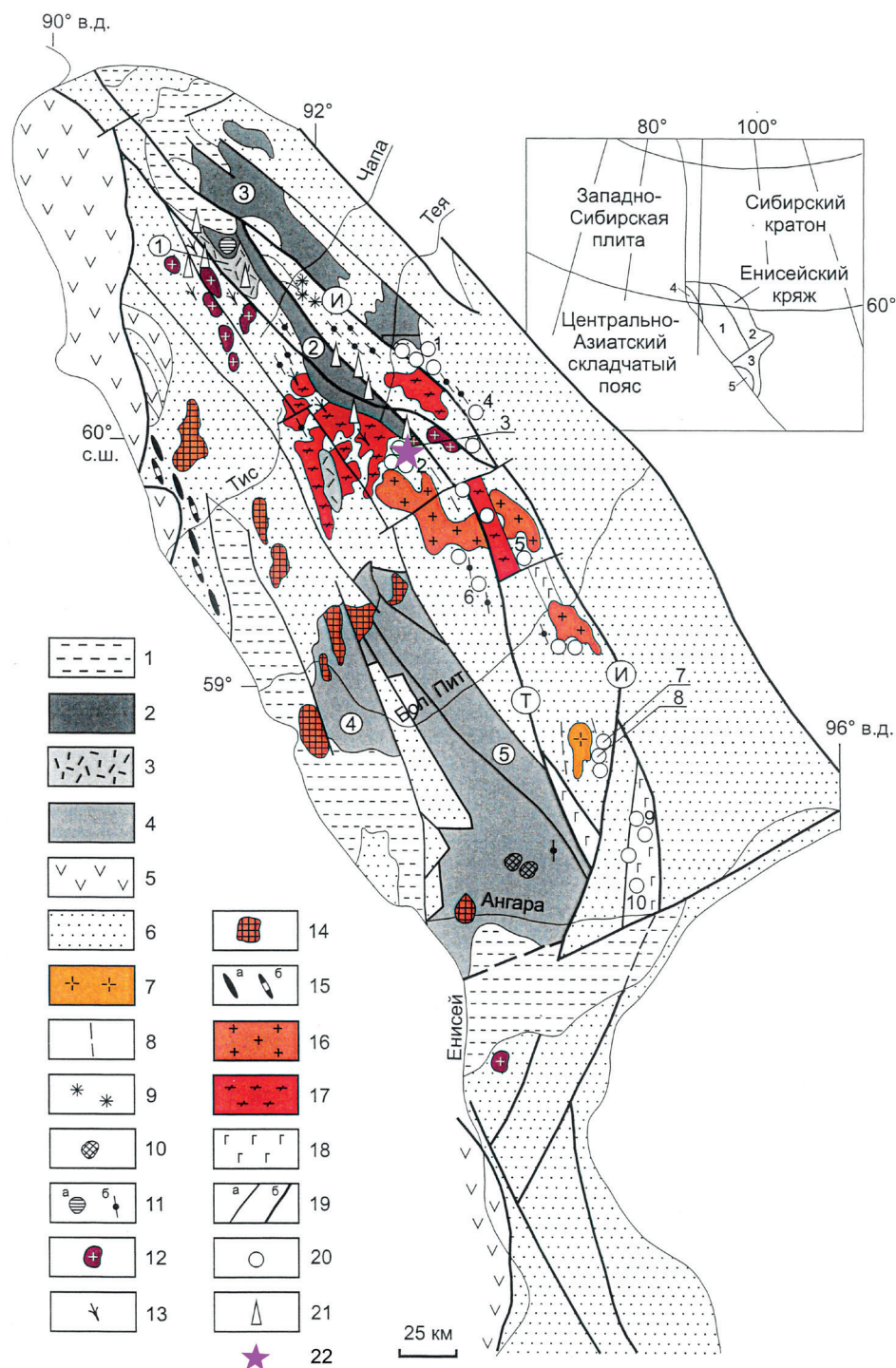


Рис 1. Положение Олимпиадинского месторождения в структурах Енисейского края (по материалам [1; 5; 9; 12], с добавлениями авторов)

1 – чехол (PZ–KZ); 2–4 – рифтинговые терригенно-вулканогенные комплексы (NP) чингасанской (2), верхнево-роговской (3) и орловской (4) серий; 5 – офиолитовые и островодужные комплексы (NP; 6 – нерасчлененные отложения докембрия (PP–NP) (канская, енисейская, тейская, сухопитская, тунгусикская, чапская серии); 7–18 – орогенные и внутриплитные комплексы: 7 – татарский – субщелочные лейкограниты (630 млн лет), 8 – карбонатитовые жилы (650 млн лет), 9 – чапинский – щелочные пикриты (670 млн лет), 10 – среднетатарский – ийолиты, фойяиты (675–620 млн лет), 11 – захребетинский – субщелочные габброиды, нефелиновые и щелочные сиениты (700 млн лет), 12 – кутукасский – субщелочные лейкограниты (700–690 млн лет), 13 – ковригинский – дайки риолит-порфиров и габбродолеритов (750 млн лет), 14 – глушихинский – субщелочные лейкограниты (752–718 млн лет), 15 – дайки гранитоидного (а) и базитового (б) состава (797–787 млн лет), 16 – аяхтинский – субщелочные граниты (760–750 млн лет), 17 – орогенные граниты каламинского типа (880–857 млн лет) и гранитогнейсы тейского комплекса (950 млн лет), 18 – вулканы Рыбинско-Панимбинского пояса; 19 – разломы (а), системы разломов (б): Т – Татарская, И – Ишимбинская; 20, 21 – месторождения: золоторудные (20), урановые и золотоурановые (21); 1 – Советское, 3 – Благодатное, 4 – Эльдорадинское, 5 – Панимбинское, 6 – Ведугинское, 7 – Герферд, 8 – Удереиское, 9 – Раздольнинское, 10 – Попутнинское; 22 – Олимпиадинское месторождение золота. Цифры в кружках: 1 – Верхневороговская грабен-синклиналь; 2 – Уволжский грабен; 3–5 – Тейско-Чапский (3), Глушихинский (4) и Каитыбинский (5) прогибы. На врезке: 1–3 – тектонические блоки: Центральный (1), Восточный (2), Ангаро-Канский (3); 4, 5 – террейны: Исаковский (4), Предивинский (5)

нижнего–верхнего рифея, представляющие собой метаморфизованные осадочные, реже вулканогенно-осадочные образования. *Верхний структурный этаж* состоит из орогенных и субплатформенных отложений верхов рифея, венда и кембрия. В его составе имеют место осадочные карбонатные и карбонатно-глинистые отложения, дифференцированные известково-щелочные вулканы от базальтов до риолитов, мафитовые и ультрмафитовые породы, близкие по составу к офиолитам [4]. Вулканизм слабо проявлен в низах разреза и более заметен в верхнем этаже.

Множественно проявился позднепротерозойский интрузивный магматизм. Состав магматических комплексов варьирует в широких пределах от базитового до лейкогранитового. Наиболее масштабно проявились позднерифейские гранитоиды, что привело к образованию лейкократовой и мигматит-гранитовой формаций. В рифейскую эпоху на Енисейском кряже в пассивно-окраинной обстановке сформировались крупнейшие месторождения свинца и цинка, железа, талька, магнетита, а также золота. В полого дислоцированном венд-кембрийском терригенно-карбонатном чехле образовались крупные месторождения осадочных бокситов, фосфоритов, а также барита.

По количеству месторождений золота, разведанным запасам и прогнозным ресурсам Енисейский кряж является одним из лидеров в России. Месторождения принадлежат к нескольким золоторудным формациям: золото-кварцевой (Советское, Эльдорадо, Васильевское и др.), золото-сульфидной (Олимпиадинское, Тырадинское, Ведугинское и др.), золото-кварц-сурьмяной (Удереиское), золотоносных кор выветривания, золотороссыпной и др.

Золотоносность Енисейского кряжа проявилась не только в широком развитии здесь промышленных месторождений золота, но и в региональном обогащении золотом слагающих его горных пород. По данным В. Г. Петрова [13], многие стратифицированные подразделения докембрия Енисейского кряжа обладают повышенной золотоносностью. Это свиты хребта Карпинского, панимбинская, кординская, удерейская, погурьюская, шунтарская. В нижних частях свиты Карпинского – черных филлитов, аргиллитов, алевролитов, кварц-серицит-хлоритовых песчаниках содержания золота достигают 0,2 г/т. В панимбинской свите нижняя алевролитовая часть устойчиво содержит 0,05–0,09 г/т, а в пиритизированных разностях до 0,15–0,2 г/т золота. В метатерригенных породах кординской свиты содержание золота в целом близко к 0,1 г/т. В метаалевролитах и сланцах удерейской свиты также отмечается повышенная золотоносность до 0,1–0,4 г/т. Погурьюская свита сложена преимущественно метаалевролитами и содержание золота в них составляет 0,03–0,09 г/т, а в прослоях кварцевых и олигомиктовых песчаников в единичных пробах – до 0,2–0,4 г/т. Содержание золота в метаалевролитах и известняках шунтарской свиты варьирует от 0,004 до 0,01 г/т. Во всех вышеперечисленных свитах содержание золота

повышается, как правило, в разностях, обогащенных углеродистым веществом. Региональный метаморфизм и близость к гранитным массивам не влияют на содержание и распределение золота в породах.

Геологическое строение Олимпиадинского месторождения. Месторождение находится в пределах Верхне-Енашиминского рудного узла, который расположен в юго-западной части Центрального антиклинория Енисейского кряжа и сложен главным образом пассивно-окраинными и аккреционно-коллизийными комплексами пород. К пассивно-окраинным относятся песчано-сланцевые, реже карбонатные комплексы нижнего–верхнего рифея. Аккреционно-коллизийные комплексы представлены позднерифейскими гранитными интрузиями татарского и аяхтинского комплексов, другие интрузивные комплексы (глушихинский, тейеско-ерудинский и др.) развиты в значительно меньшей степени. В целом они тяготеют к блокам центрального поднятия, сложенного раннедокембрийскими гранитизированными породами.

Олимпиадинское месторождение располагается в надинтрузивной зоне крупного батолита гранитоидов аяхтинского комплекса (760–750 млн лет) [1]. Рудовмещающими на месторождении являются нижнерифейские углеродсодержащие сланцы кординской свиты, образующие в пределах рудного поля антиклинальную складку в зоне сочленения субширотного Главного разлома и оперяющего разлома северо-восточного простирания (рис. 2). Рудные тела стратиформного типа на дневной поверхности образуют два разобценных тела – западное и восточное [3].

При изучении керна скважин, пройденных на месторождении, выделено несколько групп породных ассоциаций, которые занимают определенное положение в разрезах среднекординской подсвиты.

Верхняя часть разреза большинства скважин представлена кварц-биотитовыми и кварц-мусковит-серицитовыми сланцами, содержащими переменное количество граната. В некоторых разрезах наблюдается переслаивание этих пород друг с другом. Ниже по разрезу залегают сланцы, обогащенные углеродистым веществом («черные» сланцы). Ниже по разрезу размещается пачка пород, обогащенных карбонатным материалом различной природы – от осадочной до метаморфогенно-гидротермальной. В ее пределах выделяются линзы известняков, частично мраморизованных, а также слюдисто-карбонатные, иногда углеродисто-карбонатные сланцы, в составе которых карбонатные минералы, скорее всего, связаны с процессом березитизации и поэтому имеют гидротермальное-метасоматическое происхождение. Нижняя пачка подсвиты имеет пестрый состав, с вариациями в разрезах из различных частей месторождения. Она представлена разнообразными кварц-слюдистыми сланцами – кварц-биотитовыми, кварц-мусковит-серицитовыми, кварц-двуслюдяными, кварц-слюдисто-полевошпатовыми с характерной пятнисто-линзовидной текстурой.

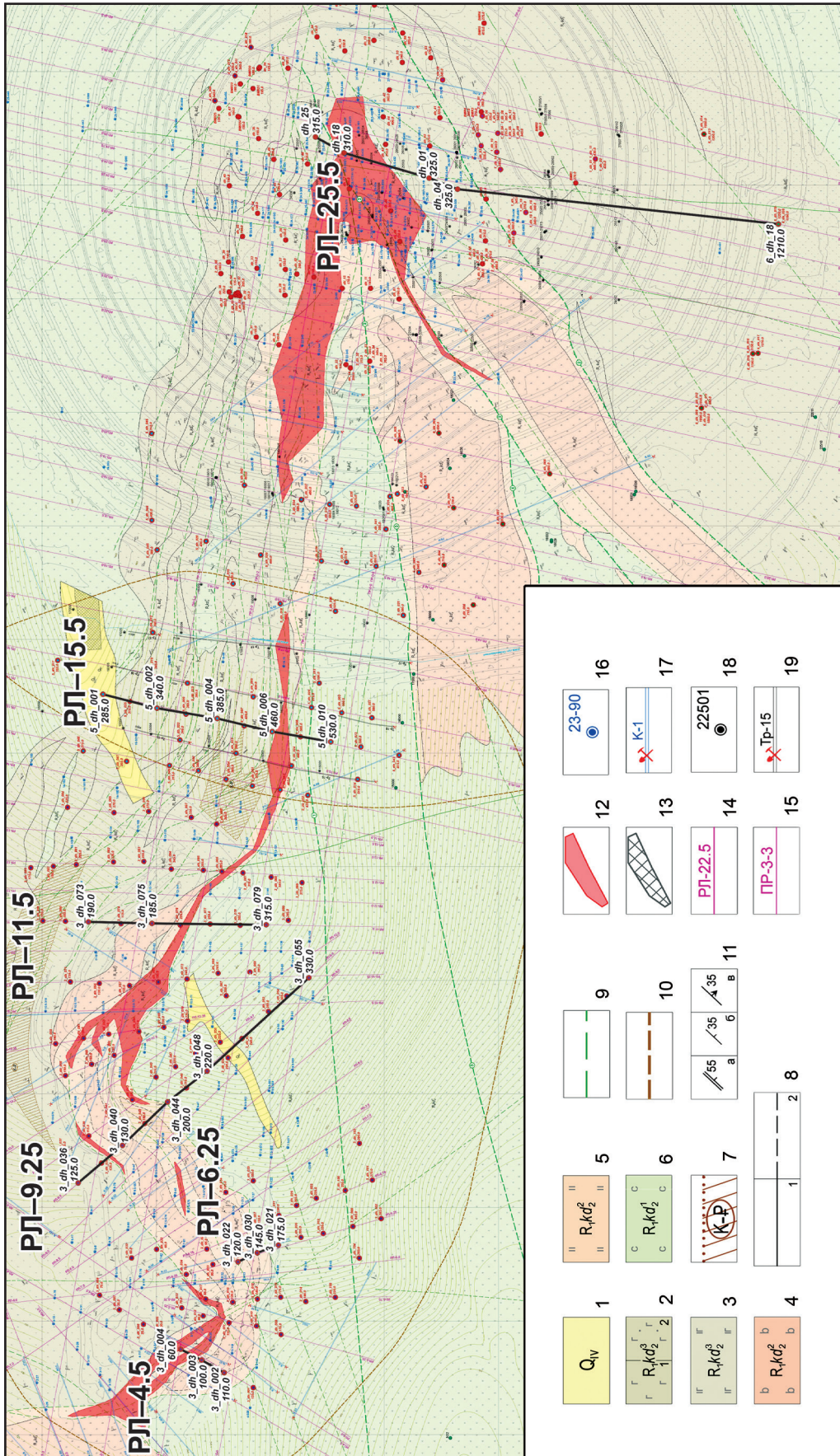


Рис. 2. Схема расположения изученных скважин на геологическом плане Олимпиадинского месторождения (по А. Н. Логачеву и др., АО «Полус Красноярск», с дополнениями авторов) 1 – современные аллювиальные отложения поймы водотоков; техногенные образования дряжных полигонов, отвалов отработанных и действующих карьеров; 2-6 – ранний рифей, кординская свита (средняя подосвита); 2, 3 – верхняя подосвита; 2 – кварц-спудистые углеродистые сланцы – 1, слабокарбонатизированные углеродистые сланцы – 2; 3 – кварц-спудисто-карбонатные апуглеродистые рудосодержащие метасоматиты), 4, 5 – средняя карбонатная пачка (4 – кварц-карбонат-темноспудистые сланцы и околорудные метасоматиты, 5 – кварц-карбонат-спудистые рудные метасоматиты), 6 – нижняя спудистая пачка (объединенные кварц-спудисто-сланцевые породы); 7 – коры выветривания и поверхностно дезинтегрированные породы рудовмещающего горизонта; 8 – геологические границы (1 – достоверные, 2 – предполагаемые); 9 – тектонические нарушения; 10 – контур проектных карьеров Западного и Восточного участков; 11 – элементы залегания кристаллизационной сланцеватости и полосчатости пород (а), слоистости пород (б) и контактов тектонических нарушений (в); 12 – рудные тела; 13 – россыпные залежи золота с продуктивностью более 150 кг/км; 14 – разведочные линии и их номера; 15 – линии продольных разрезов и их номера; 16 – скважины, пройденные ЗАО «Полус» в 2008–2011 гг.; 17 – траншеи предшествующих разведочных работ 1983–1992 гг.; 18 – скважины, пройденные ЗАО «Полус» в 2010 г.

Первичное гипогенное золотое оруденение на Олимпиаденском месторождении относится к золото-сульфидному типу. Руды месторождения представляют собой минерализованные березиты-серицитолиты слюдисто-кварцевого состава с переменным количеством карбоната, содержащие от 2 до 7% прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации. В составе рудной минерализации установлено более 50 минералов, из которых в заметных количествах присутствуют пирротин, арсенопирит, антимонит, пирит, содержания остальных рудных минералов незначительно. Золото в первичных рудах месторождения тонкозернистое, пылевидное, присутствует в виде включений в кварце, арсенопирите, реже в пирите, марказите, пирротине, антимоните, карбонатах и др. [20]. Основная масса золота сосредоточена в тонкоиглочатом арсенопирите.

Фактический материал и методика исследований. *Фактический материал.* Несмотря на высокую геологическую изученность территории Олимпиадинского рудного поля различными производственными, научно-исследовательскими и учебными организациями, ряд вопросов, касающихся петрографии и геохимии гидротермально-метасоматических и метаморфических образований, а также последовательности их проявления в пространстве и времени, остаются еще не до конца проработанными. В связи с этим в 2021 г. по договору с АО «Полус Красноярск» сотрудниками Института Карпинского были проведены работы по изучению минералого-петрографических и геохимических особенностей гидротермально-метасоматических и метаморфических образований на Олимпиадинском месторождении.

Целевая направленность работ состояла в уточнении типоморфных признаков оруденения для совершенствования критериев прогноза золоторудной минерализации в пределах Олимпиадинской площади. Для выполнения поставленных задач было проведено опробование керн разведочных скважин. Из керн производился отбор штучных геохимических проб весом 250–300 г и сколков для изготовления прозрачно-полированных шлифов (ППШ). Шаг опробования варьировал от 10 до 20 м со сгущением до 1–5 м на участках пересечения стволом скважины рудоносных зон или интенсивно проявленных метасоматитов. Опробование сопровождалось краткой документацией керн с описанием всех видимых проявлений гидротермальной и метаморфогенной деятельности.

Всего было опробовано 25 скважин по 6 профилям в западной, центральной и восточной частях месторождения, что составляет 5379 пог. м керн (см. рис. 2). Всего было отобрано 526 штучных геохимических проб и 523 сколка для изготовления прозрачно-полированных шлифов. Отбор каменного материала в пределах месторождения сопровождался схематической зарисовкой и кратким описанием отобранных образцов.

Методика минералого-петрографических исследований. При изучении петрографических осо-

бенностей пород месторождения была использована методика и структурно-вещественная классификация гидротермально измененных пород (гидротермалитов), приведенная в работах Е. В. Плющева и соавторов [14–16].

В каждом из 526 прозрачно-полированном шлифе (ППШ), характеризующем определенный образец kernового материала изученных скважин, производились:

- диагностика исходной породы;
- определение общего списка как прозрачных, так и рудных (непрозрачных) эпигенетических минералов;
- описание форм выделения конкретных минералов;
- оценка размерности кристаллических индивидов эпигенетических минералов и их агрегатов ($< 0,01$, $0,01–0,1$, $0,1–1,0$, $> 1,0$ мм);
- выяснение возрастных соотношений эпигенетических минералов как друг с другом, так и минералами исходной породы;
- выделение по сумме структурно-вещественных признаков одной или нескольких (как правило, разновозрастных) ассоциаций или парагенезисов эпигенетических минералов, подсчет процентного содержания как отдельных минералов, так и всей ассоциации в целом в принятой 9 балльной градации (< 5 , $5–10$, $10–15$, $15–20$, $20–30$, $30–40$, $40–50$, $50–80$, $> 80\%$).

Изучение ППШ производилось посредством микроскопа LEICA DMRX, микрофотографии выполнены с использованием фотокамеры LEICA MC 170 HD. Определение химического состава минералов выполнялось на электронном микроскопе с системой энергодисперсионного анализа TESCAN VEGA 3.

Работы по составлению минералого-петрографических разрезов, иллюстрирующих закономерности распределения отдельных эпигенетических минералов и их ассоциаций в плоскости разведочных разрезов включали в себя следующие два вида операций: а) кодирование и ввод результатов минералого-петрографических исследований в память компьютера, в результате чего был сформирован массив исходных минералого-петрографических данных объемом 526 объектов на 38 признаков; б) картосоставительские работы.

Картосоставительские работы выполнялись с помощью пакета прикладных программ «Surfer» с последующей конвертацией полученных графических данных в формат ArcGIS 10.2. и состояли из двух этапов.

На первом этапе строились карты-разрезы изоконцентраций отдельных индикаторных минералов для различных ассоциаций: кварца, мусковита, биотита, серицита, кальцита, граната, а также пирита, пирротина, арсенопирита, фиксирующих реальные параметры зон березитизации, а также проявления прогрессивного метаморфизма.

На втором этапе создавались карты-разрезы содержаний (интенсивности) отдельно для каждой из выделенных основных ассоциаций эпигенетических минералов и их разновидностей – фаций.

Распространенность вторичных минералов в гидротермально измененных и метаморфизованных породах Олимпиадинского месторождения

№ п/п	Минерал	Индекс	Ассоциации		Сумма
			A1	A2	
1	Серицит	Ser	132	14	146
2	Мусковит	Ms	2	51	53
3	Кварц	Qtz	160	93	253
4	Калишпат (адуляр)	Kfs (Ad)	11	3	14
5	Хлорит	Chl	121	1	122
6	Кальцит	Cc	85	6	91
7	Маргарит	Mrg	–	63	63
8	Хлоритоид	Cld	–	16	16
9	Биотит	Bt	–	104	104
10	Гранат	Grt	–	75	75
11	Плагиоклаз	Pl	–	31	31
12	Клинопироксен	Cpx	–	2	2
13	Кордиерит	Crd	–	14	14
14	Цоизит	Zoiz	–	19	19
15	Амфибол	Amf	–	2	2
16	Апатит	Ap	25	–	25
17	Титанит	Sph	–	26	26
18	Рутил	Rut	–	5	5
19	Турмалин	Turm	–	27	27
20	Пирит	Py	36	12	48
21	Арсенопирит	Apy	50	–	50
22	Антимонит	Ant	7	–	7
23	Гётит	Ht	–	3	3
24	Ильменит	Ilm	–	119	119
25	Халькопирит	Cpy	3	–	3
26	Пирротин	Pyr	–	120	120
27	Мельниковит	Min	4	4	8
28	Золото	Au	2	–	2
29	Угlistое вещество	Org	1	–	1
30	Бертьерит	Ber	1	–	1
31	Сфалерит	Spl	56	–	56
32	Галенит	Ga	2	–	2
33	Ковеллин	Cov	2	–	2
34	Блеклая руда	Fh	2	–	2
35	Сурьма самородная	Sb	14	–	14
36	Ульманнит	Ull	1	–	1
37	Гетероморфит	Het	1	–	1
38	Скиннерит	Skin	1	–	1

Примечание. Распространенность приводится в виде количества случаев обнаружения вторичного минерала в той или иной ГМ- или метаморфической ассоциации при микроскопическом изучении 523 ППШ. Ассоциации эпигенетических минералов: А1 – березиты, А2 – метаморфиты эпидот-амфиболитовой фации.

На этих картах-разрезах суммирована вся полученная информация о количественных (экстенсивных) и качественных (фациальных) особенностях проявления ГМ изменений и отдельных минералов-индикаторов гидротермальных процессов.

В общем случае площадные параметры отдельных зон измеряются первыми десятками – сотнями метров квадратных, а по вертикали развиваются на многие десятки – первые сотни метров. В пределах каждой зоны полнопроявленные

метасоматиты и кварцево- жильные гидротермалиты представляют собой незначительные по размерам сгущения эпигенетической минерализации. Хотя в отдельных случаях (буровой профиль РЛ-25.5 Олимпиадинского месторождения) разрезом вскрыто золоторудное тело, контролируемое мощным ореолом интенсивно и полнопроявленных березитов-серицитолитов фации В2 и В3. Однако на других разрезах основной объем зон, как уже отмечалось выше, приходится на умеренно- и сильнопроявленные ассоциации, составляющие в среднем 15–35% от объема исходной породы. В поле переменной проницаемости пород они фактически являются «внешними» зонами однофациальных локально проявленных метасоматитов (гидротермалитов), переход между которыми осуществляется через ряд промежуточных зон, закономерности развития которых подчиняются инфильтрационной и диффузной метасоматической зональности, теоретически обоснованной Д. С. Коржинским [7].

Методика геохимических исследований. Аналитические исследования включили в себя определение содержаний химических элементов пятью независимыми методами анализа:

– Sb, Bi, Ag, Cd, Te – ICP-MS (метод кислотного вскрытия);

– As – ICP-MS (метод царско-водочного вскрытия);

– Au, Pt, Pd – ICP-MS (метод полного кислотного вскрытия);

– Hg – метод холодного пара.

Содержания остальных 27 элементов (P, Ti, Mn, V, Cr, Ni, Co, Sc, Ba, Sr, Li, Zr, Nb, Ce, La, Y, Yb, Be, Sn, W, Mo, B, Cu, Pb, Zn, Ga, Ge) определялись методом ПКСА МАЭС (метод просыпки).

Изучение геохимических особенностей пород месторождения проводилось посредством составления геохимических карт-разрезов через рудные пересечения. Процедура составления таких карт-разрезов на примере изученных буровых профилей состояла из трех стадий:

1) подготовки и ввода геохимических данных в память компьютера;

2) оценки геохимического фона;

3) картосоставительских работ с использованием компьютерных технологий.

Основные результаты минералого-петрографических исследований. Золоторудные залежи Олимпиадинского месторождения локализованы в породах средней части кординской свиты (среднекординская подсвита) раннерифейского возраста. Рудовмещающие сланцы и мраморизованные известняки в изученных скважинах по всем шести разрезам характеризуются некоторыми общими особенностями:

– неравномерно проявленной степенью метаморфизма – от зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фаций;

– наличием реликтов структур исходных, главным образом мелкообломочных терригенных по-

род – алевропелитов, алевролитов, алевропесчаников, нередко углеродсодержащих;

– интенсивной тектонической нарушенностью рудовмещающих пород (пликативные деформации, кливажирование, милонитизация, брекчирование и т. д.);

– интенсивными метасоматическими преобразованиями, сопровождающимися развитием жильной минерализации кварцевого, кварц-карбонатного и карбонатного состава.

Всего в ходе минералого-петрографических исследований в гидротермально измененных и метаморфизованных породах всех шести изученных разрезов Олимпиадинского месторождения в качестве эпигенетических установлено 38 минералов (табл. 1), из которых самыми распространенными оказались (в порядке убывания): кварц, серицит, хлорит, биотит-флогопит, кальцит, гранат, маргарит, мусковит, плагиоклаз, титанит и апатит, а из рудных минералов – пирротин, ильменит, арсенопирит, пирит, антимонит, гётит, халькопирит, самородное золото и сурьма самородная. Распространены в меньшей степени хлоритоид, клинопироксен, цоизит, амфибол, турмалин, кордиерит и углистое вещество. Химические составы наиболее распространенных минералов приведены в табл. 2.

В процессе петрографических работ были зарегистрированы и детально описаны три разновозрастные ассоциации эпигенетических минералов (табл. 3):

– *березит-серицитолитовая* (А1) с фациальными разновидностями В1, В2 и В3, включая шесть разновидностей прожилков, связанных с процессом формирования березитовых парагенезисов;

– *«постберезитовая» метаморфогенная* (А2), обусловленная проявлением прогрессивного регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации;

– *гипергенная* (А3) (в дальнейшем не рассматривается).

Березит-серицитолитовая ассоциация. Микроскопическое изучение гидротермальных и метаморфогенных образований в ППШ по всем шести разрезам Олимпиадинского месторождения показывает, что, несмотря на проявление пострудного регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, главным типом околорудного гидротермального изменения пород, контролирующим размещение на месторождении золоторудной минерализации, являются березиты-серицитолиты, формирование которых скорее всего было связано с процессом орогенеза, сопровождавшегося складчатостью осадочных толщ рифейского возраста и тектонической перестройкой территории района.

В минералого-петрографическом отношении околосланцевые березиты и серицитолиты Олимпиадинского месторождения несут в себе все признаки, характерные для околорудных гидротермалитов, так называемых «областей разгрузки» тектоногенно-метаморфогенных амагматических рудоформирующих гидротермальных систем оро-

Таблица 2

Кристаллохимические формулы некоторых минералов Олимпиадинского месторождения, полученные по результатам микронзондовых исследований

№ п/п	Номер скважины, глубина, рудный профиль	Минерал, формула	Кристаллохимическая формула
1	Скв. dh_01, гл. 89,9 м. РП-25,5	Маргарит $\text{CaAl}_2[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	$\text{Ca}_{0,97}\text{Na}_{0,07}\text{Fe}^{2+}_{0,01}\text{Al}_{1,92}[\text{Al}_{1,78}\text{Si}_{2,22}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
2	Скв. dh_01, гл. 89,9 м. РП-25,5		$\text{Ca}_{0,87}\text{Na}_{0,2}\text{Fe}^{2+}_{0,01}\text{Al}_{1,94}[\text{Al}_{1,76}\text{Si}_{2,24}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
3	Скв. dh_01, гл. 110,6 м. РП-25,5		$\text{Ca}_{0,97}\text{Na}_{0,06}\text{Fe}^{2+}_{0,01}\text{K}_{0,01}\text{Al}_{1,89}[\text{Al}_{1,72}\text{Si}_{2,28}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
4	Скв. dh_01, гл. 110,6 м. РП-25,5	Арсенопирит игольчатый FeAsS	$\text{Fe}_{0,9}\text{As}_{0,9}\text{S}_{1,0}$
5	Скв. dh_01, гл. 110,6 м. РП-25,5	Пирротин Fe_{1-x}S	$\text{Fe}_{0,85}\text{S}_{1,0}$
6	Скв. 5_dh_001, гл. 98,7 м. РП-15,5		$\text{Fe}_{0,85}\text{S}_{1,0}$
7	Скв. 5_dh_001, гл. 98,7 м. РП-15,5		$\text{Fe}_{0,85}\text{S}_{1,0}$
8	Скв. dh_01, гл. 110,6 м. РП-25,5	Кальцит CaCO_3	$(\text{Ca}_{0,93}\text{Mn}_{0,02}\text{Mg}_{0,04}\text{Fe}_{0,01})_{\Sigma 1,0}\text{CO}_3$
9	Скв. 5_dh_001, гл. 98,7 м. РП-15,5		$(\text{Ca}_{0,92}\text{Mg}_{0,03}\text{Fe}^{2+}_{0,03}\text{Mn}_{0,2})_{\Sigma 1,0}\text{CO}_3$
10	Скв. 5_dh_001, гл. 98,7 м. РП-15,5	Хлорит $(\text{MgFe}^{2+}\text{Al})_6(\text{AlSi})_4\text{O}_{10}$ (OH) ₈	$(\text{Mg}_{2,56}\text{Fe}^{2+}_{1,95}\text{Al}_{1,42}\text{Mn}_{0,03}\text{Ca}_{0,01})_{\Sigma 5,96}[\text{Al}_{1,33}\text{Si}_{2,67}\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
11	Скв. 5_dh_004, гл. 109,5 м. РП-15,5		$(\text{Mg}_{1,91}\text{Fe}^{2+}_{2,32}\text{Al}_{1,64})_{\Sigma 5,87}[\text{Al}_{1,39}\text{Si}_{2,61}\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ Рипидолит
12	Скв. 5_dh_004, гл. 334,0 м. РП-15,5	Мусковит (серицит) $\text{KA}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	$(\text{K}_{0,86}\text{Na}_{0,11})_{\Sigma 0,97}(\text{Al}_{1,87}\text{Fe}_{0,03}^{3+}\text{Ti}_{0,03}\text{Mg}_{0,12})_{\Sigma 2,02}[\text{Al}_{0,62}\text{Si}_{3,38}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
13	Скв. 5_dh_010, гл. 491,0 м. РП-15,5		$(\text{K}_{0,94}\text{Na}_{0,01})_{\Sigma 0,95}(\text{Al}_{1,61}\text{Fe}_{0,04}^{3+}\text{Ti}_{0,03}\text{Mg}_{0,25})_{\Sigma 1,93}[\text{Al}_{0,51}\text{Si}_{3,49}\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
14	Скв. 5_dh_010, гл. 491,0 м. РП-15,5	Флогопит (биотит) $\text{K}(\text{MgFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$ (OH) ₂	$\text{K}_{0,91}(\text{Mg}_{1,88}\text{Fe}^{2+}_{0,51}\text{Mn}_{0,03}\text{Al}_{0,68}\text{Ti}_{0,04})_{\Sigma 3,14}[\text{Al}_{0,91}\text{Si}_{3,09}\text{O}_{10}](\text{O}_{1,68}\text{F}_{0,32})_{\Sigma 2}$ Mg/Fe = 3,69
15	Скв. 5_dh_010, гл. 491,0 м. РП-15,5		$\text{K}_{0,91}(\text{Mg}_{1,88}\text{Fe}^{2+}_{0,5}\text{Mn}_{0,03}\text{Al}_{0,68}\text{Ti}_{0,04})_{\Sigma 3,14}[\text{Al}_{0,91}\text{Si}_{3,09}\text{O}_{10}](\text{O}_{1,76}\text{F}_{0,24})_{\Sigma 2}$ Mg/Fe = 3,69
16	Скв. 5_dh_010, гл. 491,0 м. РП-15,5	Цоизит $\text{Ca}_2\text{Al}_3[\text{SiO}_4]_3[\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$	$\text{Ca}_2(\text{Al}_{2,96}\text{Fe}^{3+}_{0,05})[\text{SiO}_4]_3[\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$
17	Скв. 5_dh_001, гл. 132,17 м. РП-15,5	Гранат $\text{R}^{2+}_3\text{R}^{3+}_2[\text{SiO}_4]_3$	$(\text{Fe}^{2+}_{1,86}\text{Mn}^{2+}_{0,53}\text{Ca}_{0,38}\text{Mg}_{0,19})_{\Sigma 2,94}(\text{Al}_{2,04})[\text{SiO}_4]_3$ Гранат – центр зерна (альмандин)
18	Скв. 5_dh_001, гл. 132,17 м. РП-15,5		$(\text{Fe}^{2+}_{2,02}\text{Mn}^{2+}_{0,11}\text{Ca}_{0,32}\text{Mg}_{0,23})_{\Sigma 2,68}(\text{Al}_{2,05})[\text{Si}_{1,04}\text{O}_4]_3$ Гранат – край зерна (альмандин)
19	Скв. 5_dh_001, гл. 132,17 м. РП-15,5	Калишпат (адуляр) $(\text{KNa})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	$(\text{K}_{0,89})[\text{Al}_{1,01}\text{Si}_{3,02}\text{O}_8]$ Прожилок

Распространенность эпигенетических минеральных ассоциаций и их фациальных разновидностей в гидротермально измененных и метаморфизованных породах Олимпиадинского месторождения

№ п/п	Ассоциации эпигенетических минералов		Индекс фаций	Состав гидротермально-метасоматических и метаморфических фаций	Распространенность	
					фаций	ассоциаций
1	A3	Гипергенные образования	G	Ht ± Lim	4	4 (2,4%)
2	A2	Метаморфиты эпидот-амфиболитовой фации	M1	Bt + Qtz + Grt + Ms(Mrg) ± Cld ± Ilm ± Pyr	150	162 (99%)
3			M2	Ms(Mrg) + Qtz ± Bt ± Gr ± Pl ± Crd ± Ilm ± Pyr		
4			M3	Zoiz + Qtz ± Bt ± Sph ± Cld ± Amf ± Ms(Mrg) ± Cpx ± Pyr		
5	A1	Березиты (серицитолиты)	B1	Qtz + Ser (Ms) ± Chl ± Py ± Apy	66	156 (96%)
6			B2	Qtz + Ser(Ms) ± Cc ± Chl ± Ad ± Py ± Apy ± Cpy ± Ant	52	
7			B3	Cc + Qtz + Ser(Ms) + Ap ± Chl ± Ad ± Py ± Apy ± Cpy ± Ant	38	
8		Прожилки в составе березитов	E1	Qtz	8	10 (6%)
9			E2	Qtz + Cc	2	
10			E3	Qtz + Py	2	
11	E4		Py	1		
12	E5		Cc + Ad	2		
13	E6		Cc	1		

Примечание. Распространенность приводится в виде количества случаев обнаружения эпигенетической ассоциации или фации при микроскопическом изучении 526 ППШ.

генного типа, проявившихся на многих месторождениях золото-сульфидной и золото-сульфидно-кварцевой формации.

В соответствии с принятой классификацией гидротермалитов по типу метасоматоза [11; 14; 16; 19] березиты-серицитолиты являются продуктами средне-низкотемпературного кислотного и сопряженного с ним во времени субщелочного метасоматоза (Si + CaMgFe), т. е. представляют собой типичные «барьерные» гидротермально-метасоматические образования. Поэтому березиты состоят, как правило, из двух неравновесных в физико-химическом отношении минеральных парагенезисов:

1) более раннего – *кварц-серицитового*, отражающего стадию максимальной кислотности процесса березитизации (**фация В1** – Qtz + Ser/Ms ± Chl, Py, Apy);

2) более позднего – *кварц-хлорит-карбонатного*, обусловленного проявлением в тех же блоках кислотно выщелоченных пород запаздывающей во времени стадии – «волны» осаждения петрогенных и рудных компонентов (**фации В2** – Qtz + Ser/Ms + Cc ± Chl, Ad, Py, Apy, Cpy, Ant и **В3** – Cc + Qtz + Ser/Ms ± Chl, Ap, Ad, Py, Apy, Cpy, Ant).

Именно этим и объясняется такая повышенная рудоносность березитовых гидротермальных изменений, установленная на многочисленных примерах гидротермальных месторождений цветных, редких и благородных металлов.

По результатам тщательного микроскопического изучения 526 прозрачно-полированных шлифов можно утверждать, что околорудные метасомати-

ческие изменения на Олимпиадинском месторождении представлены березитами и серицитолитами всех трех выше отмеченных фаций с приблизительно равным вкладом каждой из них в общий объем ореола березитизации.

Как показывает анализ петрографо-метасоматических разрезов, на месторождении наблюдается отчетливо выраженная латеральная зональность в размещении фациальных разновидностей березитов. Березиты фации В1 получили преимущественное развитие на западном фланге месторождения (РЛ-4.5, РЛ-6.25, РЛ-9.25), тогда как березитовые парагенезисы фации В3, которые наиболее обогащены новообразованиями карбоната, – на его восточном фланге (РЛ-25.5). Березиты фации В2 в равной степени проявились как в западной, так и центральной и восточной частях месторождения.

Количественные уровни интенсивности проявления березитовых парагенезисов по сумме всех трех фаций – В1 + В2 + В3 – редко опускаются ниже 25–30% новообразованных минералов, что указывает на то, что все изученные скважины как бы «повисли» в мощном ореоле объемно минерализованных и березитизированных пород и не вышли за его пределы как в латеральной, так и в вертикальной плоскости.

Это свидетельствует в целом о незначительном эрозионном срезе вертикальной колонны околорудных березитовых метасоматитов, проявившихся во вмещающих породах Олимпиадинского месторождения. Однако ориентируясь на выявленные закономерности в распределении различ-

ных фаций березитов-серицитолитов по латерали, можно утверждать, что восточный фланг месторождения, где доминирующее развитие получили обогащенные карбонатом березиты-серицитолиты фации ВЗ (РЛ-25.5), эродирован в значительно меньшей степени по сравнению с его западным флангом, где березиты-серицитолиты фации ВЗ проявлены либо слабо, либо вообще отсутствуют (РЛ-4.5).

«Постберезитовая» метаморфогенная ассоциация. Вышерассмотренные околорудные березитовые и серицитолитовые парагенезисы Олимпиадинского месторождения (по сравнению с другими золото-сульфидными месторождениями орогенного типа России и стран СНГ) отличаются широким развитием метаморфогенных минеральных ассоциаций эпидот-амфиболитовой фации, проявившихся в ранее березитизированных блоках пород месторождения. Это создает особые трудности при изучении околорудных березитов и серицитолитов как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях из-за того, что они во многом закамуфлированы (затушеваны) минеральными новообразованиями метаморфогенной стадии.

На Олимпиадинском месторождении околорудные березиты и серицитолиты содержат достаточно простой набор породообразующих минералов. Как правило, преобладают в их составе кварц, серицит-мусковит, карбонат и хлорит, а также разнообразные сульфиды – пирит, арсенопирит, антимонит, халькопирит, сфалерит.

Прогрессивный региональный метаморфизм в минерализованных породах Олимпиадинского месторождения выразился в тотальной перекристаллизации и укрупнении зернистости минеральных ассамблей березитов и серицитолитов, а также в появлении в их составе не свойственных им чужеродных по происхождению минеральных новообразований, более устойчивых в повышающихся Р-Т условиях. Продукты регионального метаморфизма в виде пойкилобластических метакристаллов и порфиробластов биотита, маргарита, мусковита, граната, хлоритоида, кордиерита, цоизита, амфибола, клинопироксена и других более редких минералов по отдельным трещинкам и зонам рассланцевания проникают в минеральные агрегаты березитов-серицитолитов. При этом зерна кварца и карбоната березитов, как правило, интенсивно перекристаллизуются, укрупняясь в размерах в несколько раз, тогда как серицит замещается маргаритом и мусковитом, хлорит-биотитом и хлоритоидом, а рудные минералы (пирит и арсенопирит) переходят в пирротин.

В ходе этого процесса в мелко-среднекристаллических агрегатах кварц-хлорит-серицитового, кварц-хлорит-карбонатного, кварц-хлоритового и карбонат-хлоритового состава березитов формируются крупные (до 1–2 мм в поперечнике) метакристаллы граната, биотита, клинопироксена, цоизита и амфибола пойкилобластического и порфиробластического характера, переполненные микровключениями кварца, серицита, карбо-

ната и хлорита березитов-серицитолитов. Конечные продукты метаморфогенного преобразования березитов представляют собой, как правило, полнокристаллические минеральные парагенезисы со средне-крупнозернистой лепидогранобластовой и лепидо-нематогранобластовой структурой, массивной, полосчатой и сланцеватой текстурой. Наиболее характерные петрографические особенности изученных пород показаны на рис. 3–5.

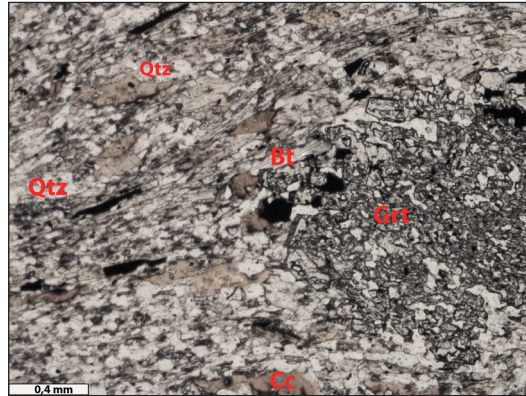
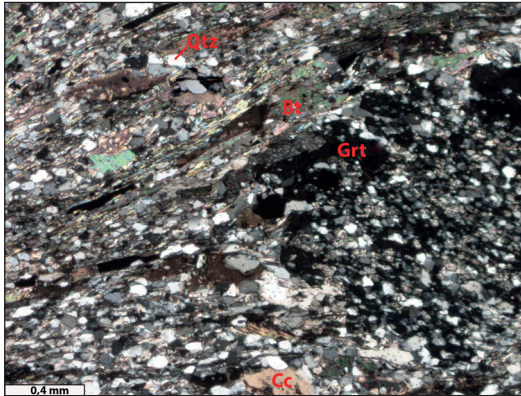
Степень метаморфического воздействия на березитизированные породы в пределах Олимпиадинского месторождения варьирует в широких пределах – от полного их отсутствия до полнопроявленных метаморфитов. Намечается отчетливая тенденция ослабления интенсивности метаморфических преобразований минерализованных пород в восточном направлении. Восточный фланг месторождения затронут метаморфическими изменениями достаточно слабо (РЛ-25.5), тогда как в центральной и западной частях месторождения региональный метаморфизм выражен наиболее отчетливо, полностью захватывая весь объем ранее березитизированных золотоносных пород (РЛ-4.5, РЛ-6-25, РЛ-9.25, РЛ-11.5 и РЛ-15.5).

В рудных интервалах минерализованных пород также наблюдаются отчетливые признаки регионального метаморфизма, выраженные главным образом в тотальной перекристаллизации минеральных агрегатов, сопровождавшейся повсеместным замещением пирита и арсенопирита пирротином. При этом пирротин нередко образует псевдоморфозы по арсенопириту и унаследует морфологию характерных «ромбов», свойственных арсенопириту, но не встречающиеся у пирротина (рис. 4). Прожилки карбоната, кварца, адуляра, березитов при метаморфизме деформируются, будинируются, сминаются в складки, разрываются на отдельные фрагменты (рис. 5). В березитах и березитизированных породах резко понижается вплоть до полного исчезновения содержание углеродистого вещества (см. табл. 1), хотя в целом в сланцах кординской свиты за пределами месторождения его много. По всей видимости, оно как бы «выгорает» при формировании березитов-серицитолитов, скорее всего переходя при этом в карбонаты.

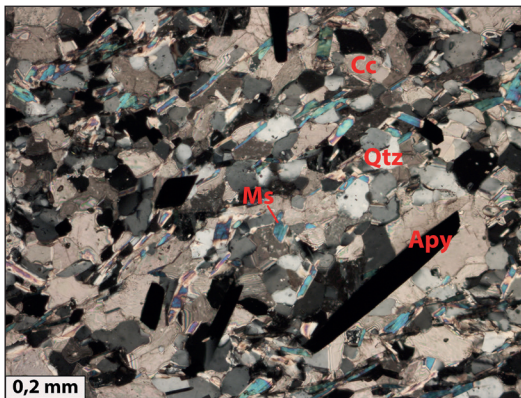
Таким образом, околорудные березиты-серицитолиты Олимпиадинского месторождения были сформированы до начала проявления регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации. То есть метаморфиты являются постберезитовыми и, соответственно, пострудными по отношению к золото-сульфидной рудной минерализации. Именно с этим обстоятельством и были связаны наибольшие сложности при визуальной диагностике и идентификации березитовых изменений в процессе документации керн скважин.

Полнопроявленные метаморфизованные березиты-серицитолиты, к которым относятся и сами руды золота, в основной своей массе сложены минеральными агрегатами кварца, карбоната, серицита-мусковита и сульфидов и чаще всего имеют облик метаморфических сланцев, но нередко

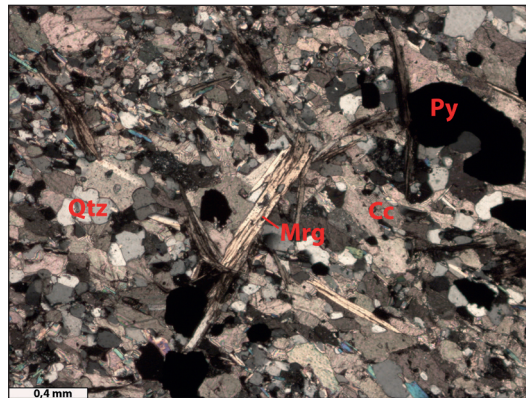
Обр. 1013-21



Обр. 1153-21



Обр. 1152-21



Обр. 2013-11

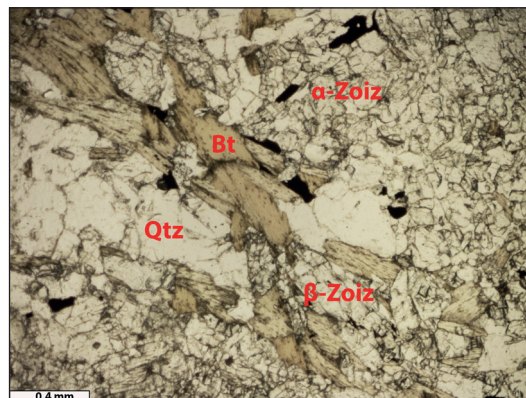
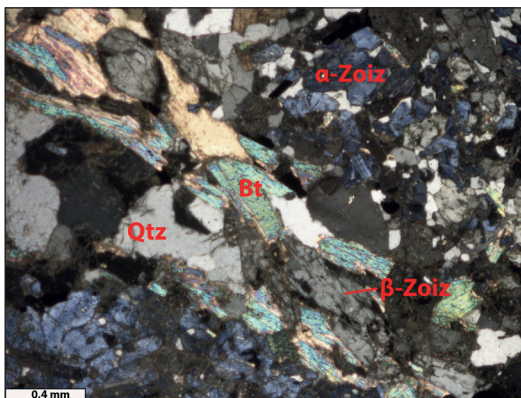


Рис. 3. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности внутреннего строения агрегатов березитов-серицитолитов фаций В2 и В3 с наложенной метаморфогенной минерализацией биотит-гранатового и мусковит-маргаритового составов

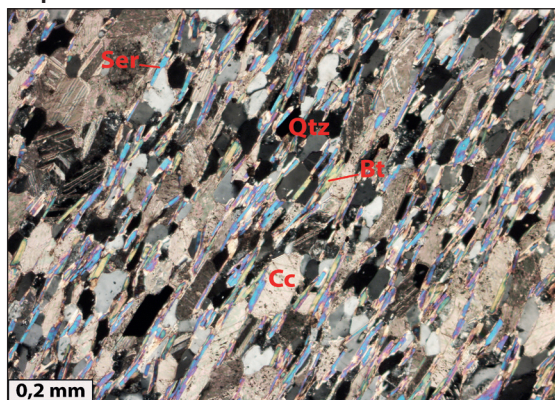
Обр. 1013-21. Характер проявления новообразований метаморфогенного граната и биотита-флогопита в березитизированных сланцах кординской свиты. Гранат образует пойкилобластические метакристаллы, переполненные микровключениями кварца, серицита и карбоната. Ув. 5х. Скв. 6_dh_018, гл. 1051 м, Au – 0,049 г/т, As – 2,7 г/т, Sb – 64,8 г/т. Слева – николи +, справа – II.

Обр. 1153-21. Средне-мелкокристаллический гранолепидобластовый агрегат слабометаморфизованного березита фации В3 кварц-серицит-мусковит-карбонатного состава с вкрапленностью арсенопирита. Ув. 10х, николи +. РЛ-9.25, Скв. dh_04, гл. 118,6 м. Au – 11,2 г/т, As – 1,32%, Sb – 62,5 г/т.

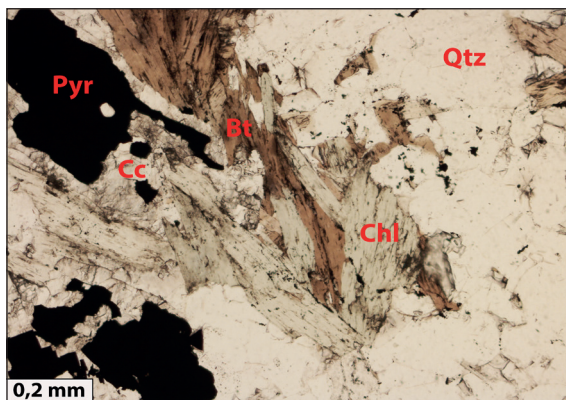
Обр. 1152-21. Характер проявления новообразований маргарита в серицит-кварц-карбонатном пиритсодержащем агрегате метаморфизованных березитов фации В3. Ув. 5х. николи +. РЛ-9.25, Скв. dh_04, гл. 230,0 м. Au – 0,24 г/т, As – 89,6 г/т, Sb – 208 г/т.

Обр. 2013-11. Деформированный и будинированный прожилок кварца (фашия березитов В1), который частично замещается метаморфическими минералами – биотитом и β -цоизитом. Ув. 5х. РЛ-6,25. Скв. 3_dh_030. Гл. 123,0 м. Au – 0,051 г/т, As – 0,12%, Sb – 35,7 г/т. Слева – николи +, справа – II

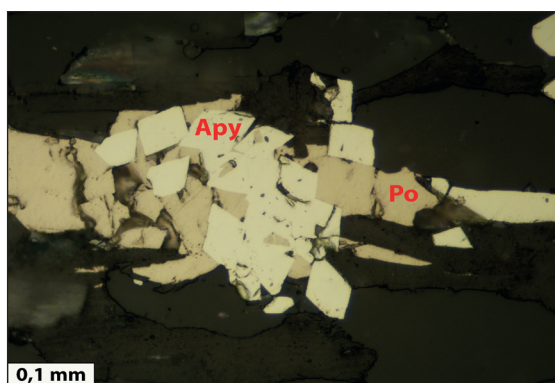
Обр. 1094-21



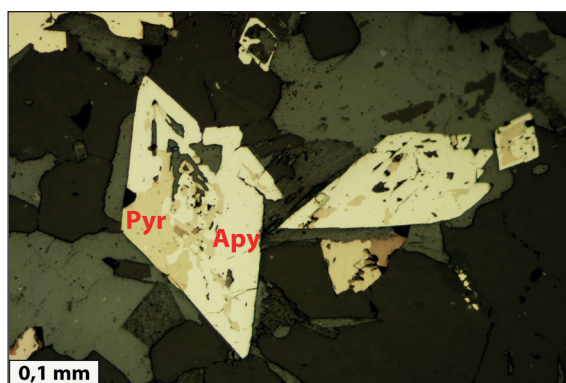
Обр. 2078-21



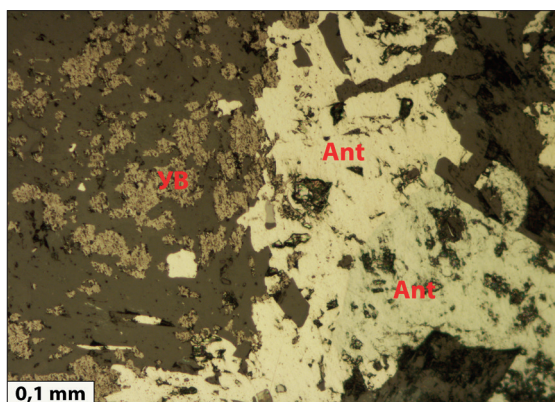
Обр. 1098-21



Обр. 1121-21



Обр. 2053-21



Обр. 2114-21

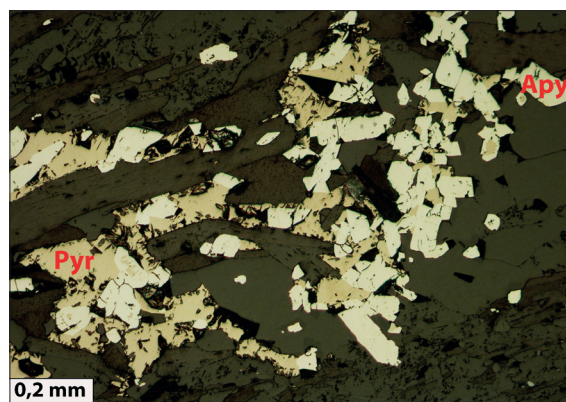


Рис. 4. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов, характеризующих вещественные и структурно-текстурные особенности строения метаморфизованных агрегатов рудоносных березитов-серцитолитов фаций В2 и В3, а также особенности проявления в них сульфидной минерализации

Обр. 1094-21. Кварц-серцит-мусковит-карбонатный метасоматит со сланцеватой текстурой – березит-серцитолит (фация В3), перекристаллизованный в условиях регионального метаморфизма. Ув. 10х, николи +. РЛ-15.5, Скв. 5_dh_006, гл. 376,0 м, Au – 10,9 г/т, As – 15,2 г/т, Sb – 11,5 г/т.

Обр. 2078-21. Замещение хлорита березитов бурым биотитом-флогопитом в метаморфизованных агрегатах березитов серцит-карбонат-кварцевого состава (фация В2). Ув. 10х, без анализатора. РЛ-25.5, Скв. 5_dh_004, гл. 149,5 м, Au – 0,052 г/т, As – 40,8 г/т, Sb – 1,92 г/т.

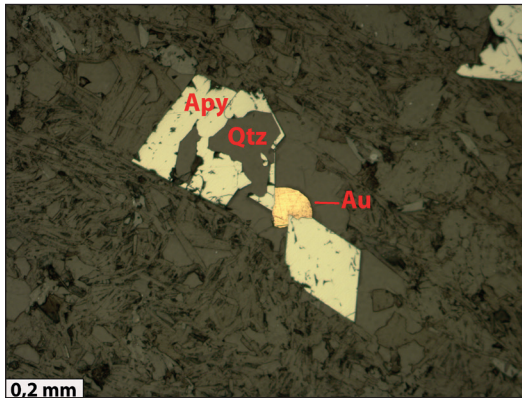
Обр. 1098-21. Обрастание и замещение арсенопирита пирротином при метаморфизме золотоносных березитов. Отчетливо видна псевдоморфоза пирротина по арсенопириту – характерный «ромб», выполненный пирротином. Ув. 20х. Отраж. свет, николи II. Скв. 5_dh_006, гл. 395,0 м, Au – 14,8 г/т, As – 0,69%, Sb – 270 г/т.

Обр. 1121-21. Псевдоморфозное замещение арсенопирита пирротином в березите фации В3. Ув. 20х. Отраж. свет, николи II. РЛ-25.5. Скв. dh_01. Гл. 119,0 м, Au – 2,7 г/т, As – 1,09%, Sb – 694 г/т, Mn – 1,1%.

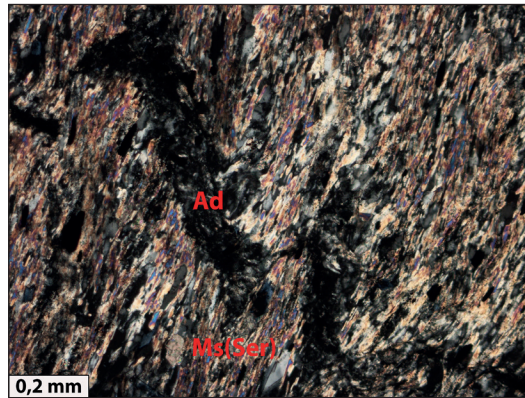
Обр. 2053-21. Ассоциация антимонита и углеродистого вещества в кальците и хлорите березитов фации В3. Хорошо видно сильное двуотражение у антимонита. Ув. 20. Отраж. свет, николи II. РЛ-15.5. Скв. 5_dh_002, гл. 171,0 м, Au – 0,18 г/т, As – 90,1 г/т, Sb – 0,35%.

Обр. 2114-21. Развитие метаморфического пирротина по арсенопириту березитов фации В2. Хорошо видны «ромбы» и «таблички» – псевдоморфозы пирротина по арсенопириту. Ув. 10. Отраж. свет, николи II. Скв. 5_dh_010, гл. 338,0 м, Au – 2,52 г/т, As – 1,27%, Sb – 93,8 г/т

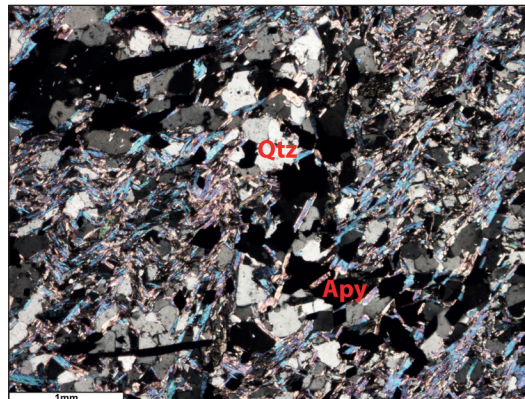
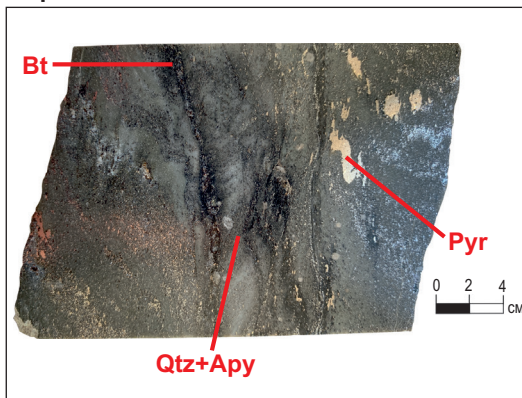
Обр. 3020-21



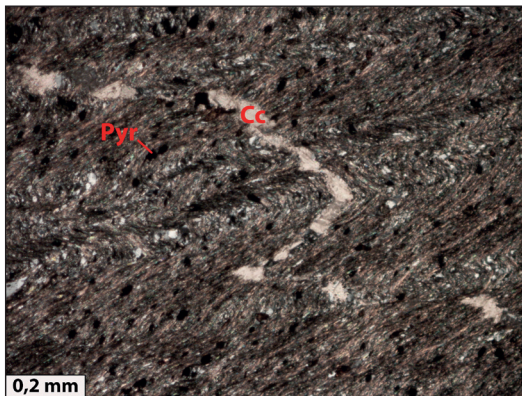
Обр. 3057



Обр. 2130



Обр. 2145-21



Обр. 3196-21

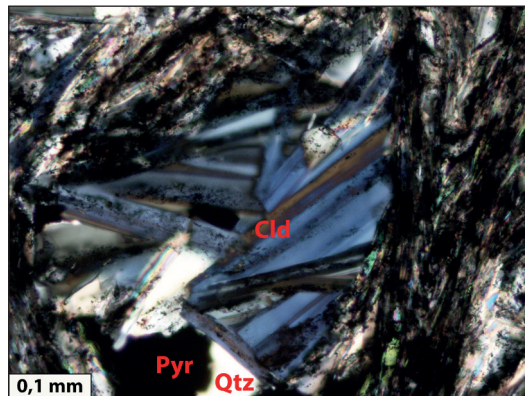


Рис. 5. Олимпиадинское месторождение. Фотография и микрофотографии рудных агрегатов и околорудных метасоматитов
Обр. 3020-21. Самородное золото в парагенезисе с арсенопиритом в кварцевом прожилке из серицит-карбонат-кварцевого агрегата березитов фации В2. Ув. 10х, отраж. свет, николи II. РЛ-11,5. Скв. 2_dh_079, гл. 210,8 м. Au – 46,5 г/т, As – 1,26%, Sb – 79,9 г/т.
Обр. 3057. Прожилок адуляра, являющегося составным элементом ореола околорудных березитов, будинирован и деформирован более поздним метаморфизмом. Ув. 10, николи +. РЛ-11,5. Скв. 3_dh_075, гл. 39,3 м. Au – 0,015 г/т, As – 2,01 г/т, Sb – 3,86 г/т.
Обр. 2130. Метаморфизованный рудный березит. Слева – фото образца, в центральной части виден будинированный рудный кварцевый прожилок с арсенопиритом, по прожилку частично развивается биотит. Справа – фото шлифа. Кварцевый (рудный) прожилок с арсенопиритом в процессе более позднего метаморфизма деформирован, S-образно изогнут, пересекается метаморфической сланцеватостью. Ув. 2,5, николи +. Скв. 5_dh_010, гл. 458,0 м. Au – 5,11 г/т, As – 1,02%, Sb – 53,1 г/т.
Обр. 2145-21. В метаморфизованном черном сланце деформированный при метаморфизме прожилок кальцита (березит фации В2). Ув. 10, николи +. РЛ-9,3. Скв. 3_dh_036, гл. 57,0 м. Au – 0,015 г/т, As – 41,7 г/т, Sb – 10,7 г/т, Zn – 400 г/т, Li – 120 г/т, V – 200 г/т.
Обр. 3196-21. Хлоритоид в метаморфизованном черном сланце. Ув. 20, николи +. РЛ-25,5. Скв. dh_18, гл. 256,3 м. Au – 0,059 г/т, As – 2,18 г/т, Sb – 53,5 г/т, Zn – 300 г/т, Cu – 360 г/т, Li – 140 г/т, Ni – 200 г/т, Co – 120 г/т, V – 77 г/т

березиты-серицитолиты были весьма устойчивы к воздействию более позднего метаморфизма, сохраняя при этом массивную текстуру. Наиболее высокие концентрации золота, как было показано выше, ассоциируют с березитами-серицитолитами фации В3, обогащенными новообразованным карбонатом, который представлен магниезально-железистой разностью кальцита с повышенными содержаниями марганца (см. табл. 2).

В березитах месторождения помимо метасоматического карбоната встречаются линзы мраморизованных известняков. В. Н. Холодов [17] на примере диагенеза и катагенеза глинистых осадков показал, что в процессе диагенеза рассеянные в породе карбонаты неустойчивы и растворяются. Кальцит может сохраняться только в том случае, если его в породе достаточно много (например, в известняках). В этом случае повышенные содержания рассеянного карбоната в метаморфических породах (сюда не входят мраморы, образующие замкнутую устойчивую систему) могут указывать на то, что это не остаточный осадочный карбонат, сохранившийся после литогенеза, а гидротермальный наложенный карбонат березитов. Вследствие этого можно утверждать, что подавляющая масса карбонатов в рудовмещающих породах на Олимпиадинском месторождении является по своей природе метасоматической. Хотя отличить гидротермально-метасоматический карбонат от осадочного при наложении березитизации на линзы мраморизованных известняков практически невозможно.

Основные результаты геохимических исследований. Для обработки геохимической информации был подготовлен массив данных объемом 526 объектов на 37 признаков – геохимических параметров. Матрица исходных данных подвергалась математической обработке с вычислением основных статистических параметров. За геохимический фон по всей совокупности элементов были приняты средние геометрические значения каждого из элементов, полученные на основе статистической обработки геохимических выборок, включающих пробы, отвечающие только минимально ГМ измененным и минерализованным породам. Выбор в пользу среднего геометрического сделан не случайно, т. к. его величина в наименьшей степени зависит от супераномальных «выбросов» одного из элементов, входящих в ассоциацию.

Как и в случае с петрографическими данными, картосоставительские работы на этой стадии выполнялись с помощью пакета прикладных программ «Surfer» с последующей конвертацией полученных графических данных в формат ArcGIS 10.2.

Работы состояли из трех этапов.

На *первом этапе* для каждого бурового профиля составлялись карты-разрезы изоконцентраций распределения отдельных элементов, отображающие в виде изолиний (в единицах фона) структуру распределения геохимических признаков в плоскости каждого из изученных разрезов.

На *втором этапе* на основе использования стандартной программы факторного анализа (метод главных компонент) осуществлялась операция по выявлению корреляционных связей между геохимическими признаками по всей сумме объектов, учтенных в базе данных. С этой целью использовался файл нормированных признаков как наиболее «свободный» от геохимической специализации исходных пород. На основе использования стандартной программы факторного анализа (метод главных компонент) осуществлялась операция по выявлению тонкой структуры корреляционных связей между геохимическими признаками по всей сумме объектов (общая задача факторного анализа).

На следующем этапе работ для каждого из изученных буровых профилей строились карты-разрезы распределения как моноэлементных, так и мультипликативных геохимических параметров. На них на геологической основе в специальной цветной легенде отображена степень концентрации элементов в геохимических ореолах относительно фона (в 1,5, 2,5, 5,0 и 10Сф). Они в максимальной степени отражают структуру положительной составляющей аномального геохимического поля, обусловленного проявлением всей совокупности эпигенетических процессов дифференциации вещества в гидротермально измененных и метаморфизованных породах месторождения.

Анализ факторной диаграммы (рис. 6) и матрицы парных коэффициентов корреляции (табл. 4) показывает, что геохимические особенности гидротермально измененных и метаморфизованных пород Олимпиадинского месторождения ассоциируются следующими шестью ведущими ассоциациями скоррелированных элементов: R1 = AuAsTe, R2 = SbHg, R3 = CuPbZnMoAgBiLiP, R4 = PdMnSr, R5 = GeGaNiCoCrPtVSnB и R6 = LaCeYbZrNbBeTi, из которых первые три имеют отчетливо рудогенную природу, а остальные три обусловлены процессами осадконакопления и метаморфизма пород.

Как показывает анализ составленных геохимических карт-разрезов, на площади Олимпиадинского месторождения устанавливается отчетливая латеральная зональность в распределении содержаний золота и сопутствующих ему элементов (As, Te, Sb, Hg, Pb, Cu, W). С запада, северо-запада (РЛ-4.5 и РЛ-6.25) на восток и юго-восток (РЛ-11.5, РЛ-15.5 и РЛ-25.5) вслед за золотом в минерализованных породах месторождения происходит значительный высокоградиентный рост содержаний мышьяка, теллура, сурьмы и ртути, достигая максимума в оруденелых породах разреза РЛ-25.5. Близкую тенденцию поведения показывают свинец и медь, однако уровни их концентрирования в минерализованных породах месторождения значительно уступают вышеперечисленным элементам.

Сравнительный анализ минералого-петрографических и геохимических данных. Одной из наиболее характерных черт проявления гидротермальных и метаморфогенных образований

является их высокая «взаимопроницаемость» друг в друга, что обусловлено прежде всего многоэтапностью и многостадийностью формирования гидротермально-метасоматической зональности и ее отдельных звеньев, включая пострудный метаморфизм. Это приводит к тому, что в любом образце горной породы может быть зарегистрировано несколько в различной степени проявленных и, как правило, разновозрастных гидротермально-метасоматических и метаморфических минеральных парагенезисов. Иногда их количество в одном объекте доходит до 3 и более, хотя чаще всего исследователь имеет дело только с одной либо с двумя разновозрастными ассоциациями гидротермальных и метаморфических минералов. В связи с чем возникает большая проблема выявления в наиболее «чистом» виде геохимического эффекта, связанного с проявлением того или иного гидротермального или метаморфогенного изменения.

Для решения этой задачи оформлялся протокол задания, в котором в табличной форме приводился весь список «ключевых» и «обрабатываемых» признаков с фиксацией ограничений по каждому из них. Варьируя величиной ограничений по петрографическим признакам, можно было добиться такой ситуации, когда петрографическая «чистота» выборки и ее объем были вполне достаточными для получения надежных геохимических результатов. Величины таких ограничений выбирались опытным путем (методом подбора) с максимальным использованием компьютерных технологий. Кроме того, накладывались соответствующие ограничения и на сами «обрабатываемые» (геохимические) признаки, что делалось с целью «отсева» объектов с аномальными значениями содержаний элементов.

Такая манипуляция с петрографо-геохимической базой данных позволила достаточно быстро получать информацию о статистических параметрах

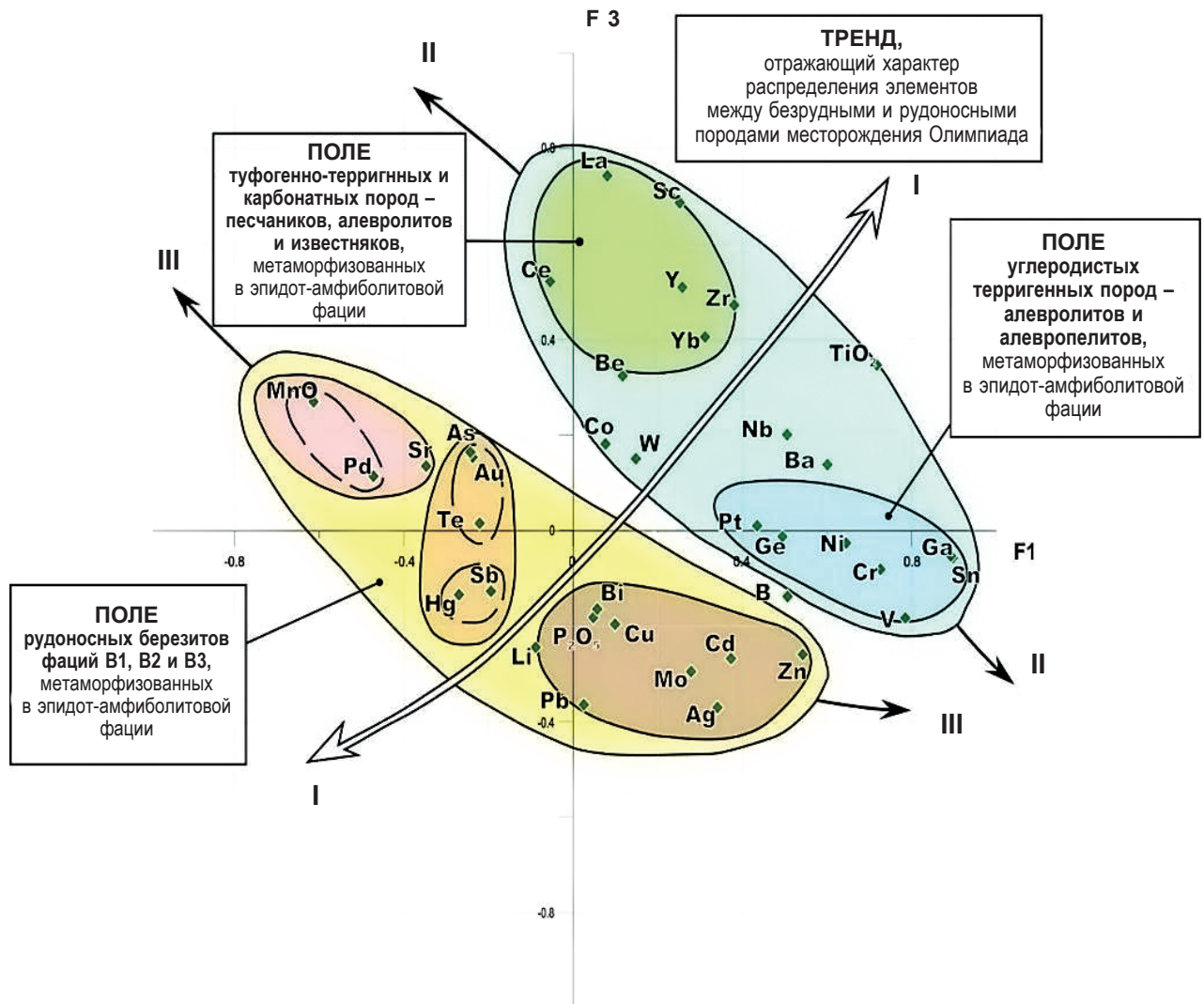


Рис. 6. Координатная диаграмма, иллюстрирующая распределение факторных нагрузок (по I и III факторам) основных геохимических параметров в ГМ измененных и метаморфизованных породах Олимпиадинского месторождения (количество проб – 526 шт.; F1 = 19,1%, F3 = 8,6%)

Таблица 4

Матрица парных коэффициентов корреляции химических элементов в гидротермально измененных и метаморфизованных породах Олимпиадинского месторождения (по материалам опробования ядра разведочных скважин, выборка геохимических данных объемом 326 шт.)

Элементы	P2O5	Ba	Sr	TiO2	MnO	V	Cr	Co	Ni	Zr	Nb	Sc	Ce	La	Y	Yb	Be	Li	W	Mo	Sn	Cu	Pb	Zn	Ge	Ga	B	Pd	Pt	Au	As	Ag	Cd	Sb	Te	Bi	Hg	Элементы				
P2O5	1,000																																					P2O5				
Ba	-0,021	1,000																																					Ba			
Sr	0,000	-0,129	1,000																																					Sr		
TiO2	-0,029	0,499	-0,282	1,000																																				TiO2		
MnO	-0,006	-0,444	0,196	-0,289	1,000																																			MnO		
V	-0,009	0,298	-0,254	0,430	-0,466	1,000																																		V		
Cr	-0,010	0,463	-0,306	0,601	-0,484	0,559	1,000																																	Cr		
Co	0,014	0,000	-0,099	0,225	0,329	-0,087	-0,065	1,000																																Co		
Ni	0,026	0,310	-0,209	0,437	-0,207	0,473	0,226	0,574	1,000																															Ni		
Zr	0,009	0,205	-0,069	0,318	-0,161	0,231	0,105	0,062	0,258	1,000																													Zr			
Nb	0,058	0,236	-0,178	0,378	-0,195	0,341	0,326	0,243	0,324	0,334	1,000																													Nb		
Sc	0,006	0,232	0,013	0,363	0,102	0,086	-0,041	0,243	0,298	0,578	0,232	1,000																												Sc		
Ce	0,023	0,016	0,063	0,157	0,246	-0,115	-0,091	0,065	-0,012	0,197	0,000	0,235	1,000																											Ce		
La	-0,016	0,143	0,096	0,390	0,209	-0,108	-0,164	0,226	0,180	0,437	0,166	0,659	0,526	1,000																										La		
Y	0,012	0,209	0,006	0,269	-0,168	0,109	0,098	-0,104	0,039	0,398	0,104	0,504	0,181	0,435	1,000																									Y		
Yb	-0,002	0,198	-0,036	0,366	-0,099	0,234	0,231	0,010	0,057	0,196	0,160	0,321	0,108	0,284	0,447	1,000																								Yb		
Be	0,068	0,077	-0,085	0,320	0,074	-0,016	0,104	0,133	0,095	0,126	0,164	0,242	0,150	0,282	0,134	0,247	1,000																							Be		
Li	0,395	-0,090	0,013	-0,057	0,090	-0,103	-0,132	0,000	-0,051	0,002	-0,025	0,027	0,017	0,141	0,047	0,023	0,219	1,000																						Li		
W	0,015	0,075	-0,024	0,039	-0,013	0,037	0,053	0,116	0,042	0,082	0,843	0,107	-0,022	0,022	-0,008	0,039	0,035	-0,010	1,000																					W		
Mo	0,513	0,029	-0,029	0,082	-0,055	0,393	-0,037	0,133	0,398	0,112	0,077	0,103	-0,030	0,060	-0,026	0,014	0,012	0,342	-0,018	1,000																				Mo		
Sn	0,029	0,546	-0,255	0,628	-0,240	0,740	0,688	0,069	0,552	0,256	0,417	0,168	-0,038	0,011	0,129	0,220	0,087	-0,075	0,091	0,257	1,000																			Sn		
Cu	0,044	-0,005	-0,013	0,059	0,088	0,040	-0,097	0,448	0,405	0,069	0,089	0,102	0,014	0,108	-0,027	-0,041	0,087	0,204	-0,012	0,265	0,100	1,000																		Cu		
Pb	0,328	-0,042	-0,026	0,034	0,028	-0,020	-0,039	0,091	0,058	-0,016	0,039	0,001	-0,031	0,087	-0,013	0,007	0,106	0,108	0,040	0,168	0,395	0,029	0,484	1,000																	Pb	
Zn	0,055	0,234	-0,203	0,215	-0,313	0,434	0,231	0,171	0,586	0,183	0,231	0,046	-0,114	-0,082	0,042	0,018	-0,038	-0,026	0,026	0,245	0,425	0,425	0,192	0,021	1,000															Zn		
Ge	0,095	0,202	-0,033	0,213	-0,170	0,466	0,383	0,120	0,383	0,243	0,313	0,121	0,025	-0,021	-0,017	0,104	0,152	-0,029	0,095	0,228	0,593	0,129	0,037	0,295	1,000															Ge		
Ga	-0,008	0,554	-0,297	0,729	-0,571	0,709	0,735	0,039	0,516	0,185	0,376	0,125	-0,067	0,026	0,120	0,245	0,106	-0,108	0,040	0,168	0,917	0,051	0,006	0,385	0,439	1,000														Ga		
B	-0,009	0,138	-0,288	0,373	-0,316	0,479	0,412	-0,035	0,252	0,123	0,182	0,023	-0,065	-0,119	0,106	0,114	-0,044	-0,098	-0,026	0,086	0,426	-0,014	-0,059	0,266	-0,001	0,495	1,000													B		
Pd	-0,034	-0,250	0,244	-0,300	0,453	-0,356	-0,327	-0,048	-0,248	-0,236	-0,353	0,001	0,184	0,079	-0,043	-0,052	-0,119	0,009	-0,074	-0,045	-0,342	-0,051	-0,013	-0,289	-0,072	-0,379	-0,309	1,000												Pd		
Pt	-0,033	0,349	-0,205	0,365	-0,278	0,257	0,561	-0,007	0,111	0,031	0,138	0,000	-0,030	-0,081	0,071	0,127	0,061	-0,114	0,025	-0,085	0,440	-0,040	-0,058	0,110	0,187	0,475	0,264	0,009	1,000											Pt		
Au	0,010	-0,197	0,012	-0,035	0,168	-0,183	-0,212	0,195	-0,050	-0,041	-0,013	0,018	0,066	0,155	-0,020	-0,021	0,101	0,093	-0,003	0,010	-0,160	0,012	0,039	-0,124	-0,088	-0,152	-0,125	-0,017	-0,149	1,000										Au		
As	-0,025	-0,212	-0,021	-0,017	0,234	-0,200	-0,213	0,304	-0,042	-0,044	0,008	0,015	0,021	0,111	-0,136	-0,052	-0,001	0,014	0,024	-0,013	-0,173	-0,012	-0,006	-0,138	-0,124	-0,154	-0,098	-0,014	-0,112	0,715	1,000									As		
Ag	0,075	0,098	-0,164	0,199	-0,217	0,278	0,127	0,145	0,323	0,099	0,076	0,115	-0,054	0,043	0,053	0,036	0,056	0,422	-0,023	0,318	0,264	0,506	0,611	0,262	0,024	0,261	0,194	-0,192	0,031	0,024	-0,063	1,000									Ag	
Cd	0,022	0,057	0,161	-0,167	0,351	0,043	0,073	0,433	0,069	0,017	0,115	-0,070	0,056	0,094	0,033	0,033	0,165	-0,008	0,646	0,254	0,464	0,254	0,198	0,243	0,643	0,113	0,207	0,166	-0,109	-0,050	-0,057	-0,092	0,351	1,000							Cd	
Sb	0,018	-0,148	0,044	-0,128	0,091	-0,151	-0,194	-0,050	-0,123	-0,011	-0,063	-0,006	0,006	0,082	0,065	-0,013	0,187	0,619	-0,013	0,035	-0,151	0,124	0,458	-0,051	-0,055	-0,175	-0,112	-0,014	-0,014	-0,151	0,230	0,075	0,321	0,057	1,000						Sb	
Te	0,000	-0,153	0,015	-0,065	0,295	-0,193	-0,228	0,474	0,177	-0,031	-0,038	0,078	0,005	0,085	-0,120	-0,024	0,003	0,089	-0,022	0,081	-0,165	0,165	0,238	0,166	-0,064	-0,109	-0,177	-0,062	0,080	-0,123	0,322	0,307	0,156	-0,024	0,193	1,000						Te
Bi	0,007	-0,008	-0,057	0,089	-0,059	-0,004	-0,004	0,230	0,199	-0,017	0,060	-0,004	-0,041	-0,030	-0,063	-0,048	-0,006	0,000	0,030	0,031	0,019	0,174	0,258	0,035	0,034	0,028	-0,045	-0,029	0,000	0,026	0,003	0,402	0,037	-0,005	0,360	1,000					Bi	
Hg	-0,034	-0,229																																								

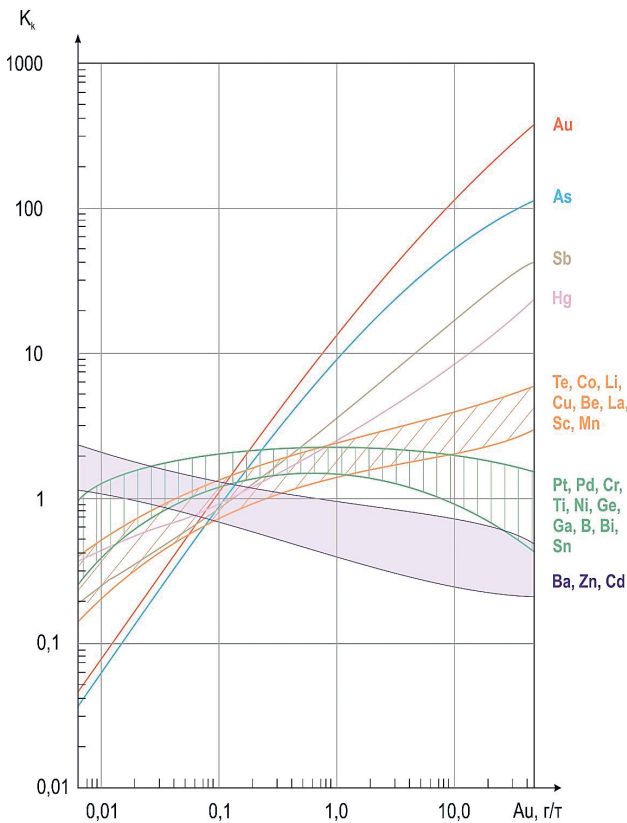


Рис. 7. Поведение элементов в концентрационной зональности Олимпиадинского месторождения

По горизонтальной оси графика – интервалы содержаний золота в минерализованных породах месторождения (г/т). По вертикальной оси – коэффициенты концентрации элементов, классифицируемые по их поведению относительно поведения золота на:

- соконцентрирующиеся с золотом – As, Sb, Hg;
- сопутствующие золоту – Te, Cu, Mn, Co, Li, Be, La;
- сопутствующие золоту с экстремальным характером поведения – Pt, Pd, Ce, Cr, Ni, Bi, Ti, Ge, B, Sn, Sc, Sr;
- деконцентрирующиеся и ведущие себя инертно – Ba, Zn, Cd, Nb, Zr, Y, Yb, W, Mo

трах распределения геохимических признаков по всему списку ГМ изменений с их подразделением на группы по степени проявленности и типу исходной породы. Эти параметры были выражены либо в абсолютных значениях (г/т), либо в единицах фона. Полученные таким образом результаты оформлялись в виде специальных таблиц. На их основе для каждого типа ГМ изменений и метаморфитов рассчитывались средневзвешенные коэффициенты привноса-выноса элементов в процентах относительно их содержаний в минимально измененных породах. Главное достоинство такого подхода к обработке петрографо-геохимических данных заключается в том, что с его помощью возникает возможность быстро выявить геохимическую специализацию различных типов ГМ образований либо оценить геохимический эффект от проявления регионального метаморфизма.

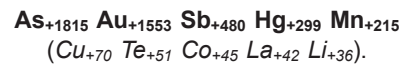
На рис. 7 приводится концентрационная зональность Олимпиадинского месторождения, иллюстрирующая поведение всех учтенных в геохимической базе данных элементов по мере поинтервального увеличения содержаний золота с

шагом, кратным десяти: < 0,01, 0,01 ÷ 0,1, 0,1 ÷ 1,0, 1,0 ÷ 10,0 и > 10 г/т,

Анализ графика показывает, что по характеру поведения элементов относительно поведения золота их можно классифицировать на: 1) соконцентрирующиеся с золотом – As, Sb, Hg; 2) сопутствующие золоту – Te, Cu, Mn, Co, Li, Be, La; 3) сопутствующие золоту с экстремальным характером поведения – Pt, Pd, Ce, Cr, Ni, Bi, Ti, Ge, B, Sn, Sc, Sr; 4) деконцентрирующиеся и ведущие себя инертно – Ba, Zn, Cd, Nb, Zr, Y, Yb, W, Mo.

Наиболее характерным для ореолов березитизации является многократный (по сравнению с малоизмененными породами) привнос в среду минералообразования прежде всего таких элементов как Au, As, Sb, Hg, Mn, Te и в меньшей степени – Cu, Co, Li, La и Sr. Обращает на себя внимание тот факт, что оруденелые породы Олимпиадинского месторождения практически не содержат повышенных концентраций **серебра** (> 1 г/т), что является чрезвычайно нетипичным для месторождений данного геолого-промышленного типа. Более того, серебро в ходе развития процесса березитизации на месторождении выносятся из среды минералообразования. Его слабо повышенные концентрации установлены только среди березитизированных пород фации В1.

Интегральная геохимическая формула, отражающая уровень концентрации элементов-примесей в ходе развития процесса березитизации–серицитолитизации всех трех фациальных разновидностей (В1 + В2 + В3) на Олимпиадинском месторождении, выглядит следующим образом:



То есть геохимически они мало чем отличаются от околорудных березитов большинства орогенных золото-сульфидных месторождений. При этом березиты-серицитолиты фаций В3 и В2, наиболее обогащенные новообразованным марганцовистым карбонатом по сравнению с безкарбонатными гидротермалитами фации В1, характеризуются значительно более высокими значениями коэффициентов концентрации золота, мышьяка, сурьмы, ртути, теллура, меди, стронция, лития и легких РЗЭ (La, Ce).

В целом березиты-серицитолиты фаций В1, В2 и В3 имеют близкую геохимическую характеристику, однако уровни накопления рудогенных элементов в березитах фации В2 и особенно В3 значительно выше, чем в безкарбонатных разновидностях березитов фации В1. Последние по сравнению с березитами-серицитолитами фаций В2 и В3 отличаются повышенными значениями коэффициентов концентрации Pb, Zn, W, Mo, Bi, Sn, Ag и В. В ходе развития процесса березитизации–серицитолитизации на Олимпиадинском месторождении ряд элементов, таких как P, V, Cr, Ba, Sn, Mo, Zn, Cd, Bi, Ag, Ge и Ga, отчетливо деконцентрируются, тогда как остальные компоненты ведут себя индифферентно (табл. 5, рис. 7).

Таблица 5

Привнос–вынос элементов в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород и метаморфитов Олимпиадинского месторождения

Элементы	Березиты и их фаціальные разновидности				Метаморфиты
	B1	B2	B3	B1 + B2 + B3	
P ₂ O ₅	10	21	-37	-19	3
TiO ₂	63	43	-20	4	37
MnO	-5	147	376	215	-7
V	40	-14	-60	-42	33
Cr	55	11	-44	-22	47
Co	59	68	33	45	28
Ni	35	20	-21	-5	25
Sc	6	26	14	16	2
Ba	21	-26	-48	-35	10
Sr	-39	14	56	25	-19
Li	7	29	48	36	11
Zr	20	6	-8	-1	5
Nb	53	28	-24	-3	23
Ce	2	4	16	11	0
La	29	39	47	42	5
Y	-3	-4	-5	-5	-3
Yb	13	10	-8	-1	5
Be	24	44	10	20	21
Sn	60	4	-59	-36	44
W	60	33	3	18	7
Mo	14	-2	-42	-27	2
B	27	32	-3	10	36
Cu	62	98	61	70	23
Pb	58	19	-35	-13	34
Zn	32	-32	-53	-39	18
Cd	-11	-37	-48	-40	-1
Bi	31	26	-44	-21	16
Au	435	1712	2017	1553	64
Ag	25	-23	-54	-39	21
Te	0	67	61	51	-1
As	567	2048	2284	1815	45
Sb	127	372	705	480	10
Hg	-5	182	568	299	-11
Pd	-25	-4	36	14	-6
Pt	38	1	-29	-14	39
Ge	63	30	-45	-19	45
Ga	56	9	-52	-29	45

Примечание. Коэффициент привноса–выноса элементов (ΔC) приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = (C_i - C) / C \times 100\%$, где C_i – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C – содержание элемента в минимально измененной породе.

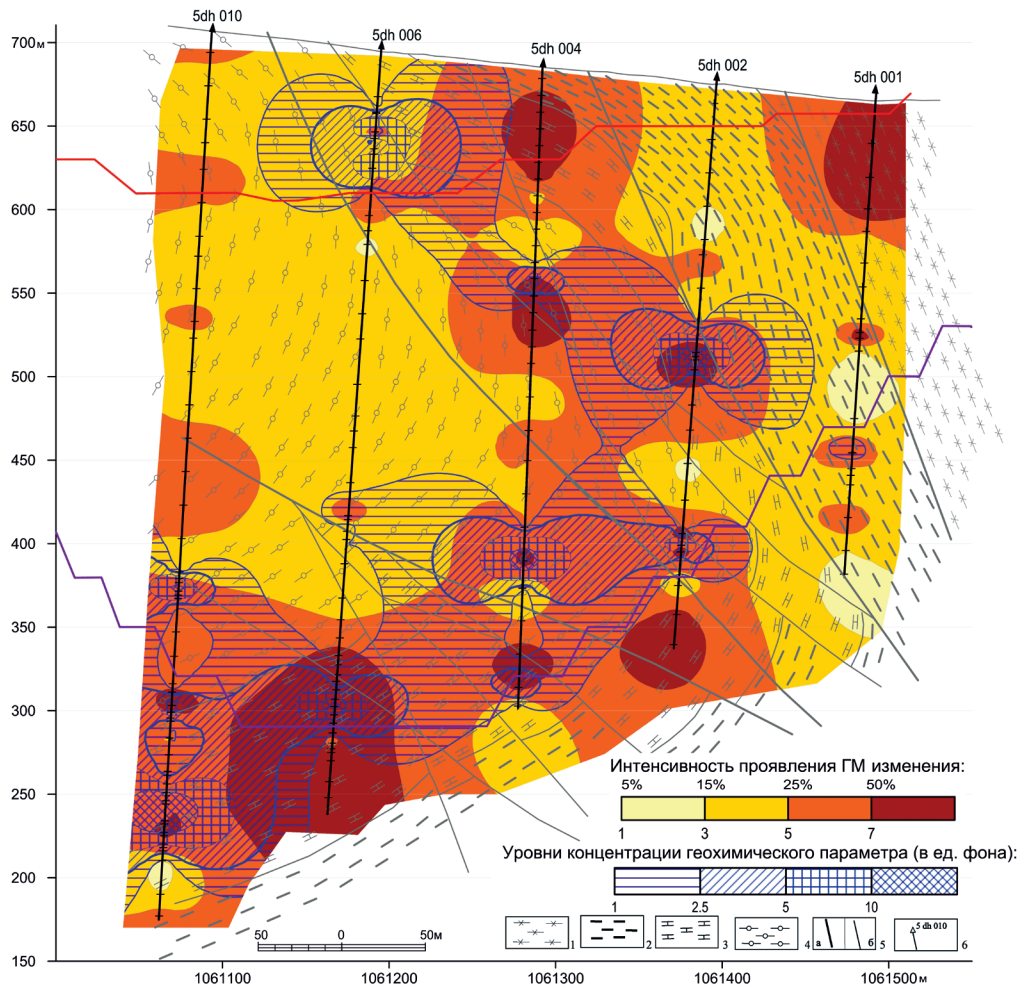


Рис. 8. Закономерности распределения значений геохимического параметра AuAsTe и интенсивности проявления процесса березитизации–серицитолитизации в метаморфизованных и гидротермально измененных породах Олимпиадинского месторождения. Профиль РЛ-15.5 (по данным геохимического опробования коренных пород, количество штучных геохимических проб в выборке – 163 шт.)

1 – биотитовые и кварц-биотитовые сланцы; 2 – углеродистые и углеродсодержащие сланцы; 3 – мраморизованные известняки; 4 – гранат-биотитовые и гранат-кварц-биотитовые сланцы; 5 – разломы: первого (а) и второго (б) порядка; 6 – скважины и их номера

Сравнительный анализ минералого-петрографических карт-разрезов, иллюстрирующих особенности строения латеральной и вертикальной гидротермально-метасоматической зональности месторождения, с геохимическими картами-разрезами однозначно свидетельствует о том, что геометрия и размеры зон березитизации–серицитолитизации во многом предопределили геометрию и размеры положительных геохимических ореолов золота, мышьяка, сурьмы, ртути, теллура, марганца и меди, приуроченных к этим зонам гидротермально измененных пород. Рис. 8 на примере бурового профиля РЛ-15.5 иллюстрирует глубокую взаимосвязь между процессом березитизации (особенно фаций В2 и В3) и формированием положительных геохимических аномалий **AuAsTe** состава, являющихся геохимическими индикаторами проявления золоторудной минерализации на Олимпиадинском месторождении.

Весь вышеизложенный минералого-петрографический и геохимический материал свидетель-

ствует в пользу того, что золоторудная минерализация Олимпиадинского месторождения была связана исключительно с проявлением процесса березитизации–серицитолитизации, а широко развитые на площади месторождения метаморфогенные парагенезисы кварц-биотит-мусковит-гранатового и кварц-хлоритоид-маргаритового состава с примесью кордиерита, клинопироксена, амфибола, цоизита, ильменита и пирротина являются «постберезитовыми», а значит и пострудными по отношению к золоторудной минерализации. Их влияние на окончательное «оформление» состава и структуры аномальных геохимических полей, обусловленных проявлением процесса околорудной березитизации–серицитолитизации, было незначительным.

Анализ минералого-петрографических и геохимических данных показал, что региональный метаморфизм эпидот-амфиболитовой фации в ранее березитизированных породах месторождения сопровождался малозначимым перераспределением

содержаний практически всех элементов в ту или иную сторону (привнос составил 10–60%, а вынос – 7–11%), что никак не могло сказаться на интенсивности и конфигурации аномальных геохимических полей главных рудогенных элементов – Au, As, Sb, Hg, Te и их спутников: Mn, Cu, Co, Sr и др., сформированных на дометаморфическом этапе эволюции тектоногенно-гидротермальной рудоформирующей системы Олимпиадинского месторождения.

Региональный метаморфизм эпидот-амфиболитовой фации в основном приводил к тотальной перекристаллизации (с укрупнением размеров зерен) ранее сформированных березитовых парагенезисов и к усложнению их минерального состава за счет возникновения на их месте новых минеральных новообразований, устойчивых в повышающихся P–T условиях регионального метаморфизма (биотит-флогопит, гранат, мусковит, маргарит, хлоритоид, кордиерит, цоизит, амфибол, клинопироксен, пирротин, ильменит и др.).

Таким образом, на основе всего вышеизложенного может быть предложен следующий набор **индикативных признаков (показателей) проявления золоторудной минерализации** в пределах Олимпиадинского месторождения, полученных в результате комплексного минералого-петрографического и геохимического изучения гидротермально-метасоматических образований (табл. 6).

1. **Березиты-серицитолиты фации В3** с интенсивностью проявления **44–51%** в качестве околорудных метасоматитов.

2. **Марганцовистый карбонат (кальцит)** с содержаниями **27–29%** в качестве главного минерала-индикатора околорудных березитов–серицитолитов фации В3. Появление высоких содержаний кальцита происходит на фоне уменьшения углеродистого вещества.

3. **Кварц-биотит-гранатовые и кварц-мусковит-маргаритовые** парагенезисы с интенсивностью проявления **4–13%** в качестве постберезитовых метаморфических образований эпидот-амфиболитовой фации с содержаниями мусковита-маргарита, биотита и граната: 2–6, 0,5–6 и 0,1–1% соответственно. Наличие в сланцах прожилков кварца, кальцита, адуляра, которые деформированы более поздним метаморфизмом: будинированы, смяты в микроскладки, растащены на отдельные фрагменты и т. п.

4. Геохимическая характеристика гидротермально измененных и метаморфизованных пород, включающая:

– интегральную геохимическую формулу околорудных березитов–серицитолитов (привнос–вынос элементов) – $As_{+1815} Au_{+1553} Sb_{+480} Hg_{+299} Mn_{+215} (Cu_{+70} Te_{+51} Co_{+45} La_{+42} Li_{+36})$;

– состав ведущих геохимических ассоциаций гидротермально измененных и метаморфизованных пород – 1) **AuAsTe**, 2) **SbHg** и 3) **BiCuPbZnMoAgLiP**;

– структуру вертикальной (латеральной – с запада на восток) рудно-геохимической зональности – **WBiMo** → **CuCo(Au)** → **AuAsTe** → **SbHg(Au)**. Ранжированный по значимости геохимический ряд

парных коэффициентов корреляции золота с основными элементами-спутниками – **As_{+0,72} Te_{+0,32} Hg_{+0,30} Sb_{+0,23}**.

Аналогичные исследования, проведенные на других рудных объектах Верхне-Енашиминского рудного узла – месторождениях Благодатное, Оленье и Титимухта также свидетельствуют о дометаморфическом возрасте рудоносных березитов этих месторождений.

Геолого-генетическая модель. На рис. 9 приводится схематическая геолого-генетическая модель формирования гидротермально-метасоматической и рудно-геохимической зональности золото-сульфидных месторождений Олимпиадинской площади. На схеме суммирована вся информация, полученная в ходе минералого-петрографического и геохимического изучения гидротермально-метасоматических образований Олимпиадинского месторождения.

Предлагаемая геолого-генетическая модель, по мнению авторов статьи, включает в себя четыре этапа.

На *первом этапе* имела место следующая последовательность геологических событий: осадконакопление в условиях морского осадочного бассейна раннерифейского возраста, диагенез, формирование масштабного геохимического ресурса золота и сопутствующих элементов (Sb, As, Te, Hg, Mo, Cu, Pb, Zn, Co, Ni) в обводненных и насыщенных H₂S, CH₄, NaCl и CO₂ вмещающих углеродистых кремнисто-терригенных и терригенно-карбонатных породах кординской свиты.

На *втором этапе* в условиях замыкания осадочного бассейна происходил катагенез, который сменялся региональным метаморфизмом зеленосланцевой фации, сопровождаемый начальным складкообразованием и проявлением гидротермальной деятельности, обусловленной активизацией и превращением седиментационных (вадных) вод осадочных пород в низкотемпературные гидротермальные растворы.

Третий этап в результате орогенеза и складчатости ознаменовался образованием складчато-надвигового сооружения, спровоцировавшего функционирование напорной тектоногенно-метаморфогенной гидротермальной рудоформирующей системы, реализовавшей геохимический ресурс осадочных пород кординской свиты в виде стратиформных ореолами березитизации–серицитолитизации фаций В1, В2 и В3 с возникновением контрастной вертикальной гидротермально-метасоматической и рудно-геохимической зональности. Выявленная на территории Олимпиадинского рудного поля гидротермально-метасоматическая зональность является по своему происхождению амагматической метаморфогенно-гидротермальной, т. е. сформированной в результате регионального метаморфизма зеленосланцевой фации пестрого в литологическом отношении крупного блока насыщенных метеорными (седиментационными) водами углеродсодержащих кремнисто-

Минералого-петрографические и геохимические индикативные признаки (показатели) проявления золоторудной минерализации в пределах Олимпиадинского месторождения

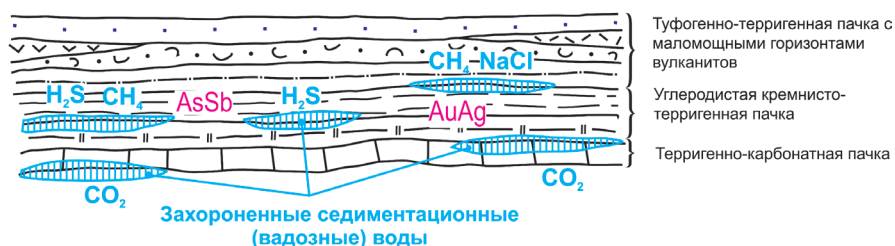
№ п/п	Индикативные признаки (показатели)	Значения индикативных признаков (показателей)	
		Состав	Содержание, %
1	Околорудные метасоматиты	Березиты-серицитолиты фации В1	3–5
		Березиты-серицитолиты фации В2	11–19
		Березиты-серицитолиты фации В3	44–51
		Березиты-серицитолиты фаций В1+В2+В3	59–73
	Минералы-индикаторы околорудных метасоматитов	Qtz – кварц	23–29
		Сс – марганцовистый карбонат (кальцит)	27–29
Ser/Ms – мусковит-серицит		3–5	
2	Региональный метаморфизм	Эпидот-амфиболитовая фация	3–13
	Минералы-индикаторы метаморфитов	Mrg – маргарит	2–6
		Bt – биотит-флогопит	0,5–6
		Grт – гранат	0,1–1
3	Интегральная геохимическая формула околорудных березитов-серицитолитов (привнос–вынос элементов)	As ⁺¹⁸¹⁵ Au ⁺¹⁵⁵³ Sb ⁺⁴⁸⁰ Hg ⁺²⁹⁹ Mn ⁺²¹⁵ (Cu ⁺⁷⁰ Te ⁺⁵¹ Co ⁺⁴⁵ La ⁺⁴² Li ⁺³⁶)	
	Ведущие геохимические ассоциации гидротермально измененных и метаморфизованных пород	1) AuAsTe; 2) SbHg; 3) BiCuPbZnMoAgLiP	
	Вертикальная (латеральная – с запада на восток) рудно-геохимическая зональность	WBiMo → CuCo(Au) → AuAsTe → SbHg(Au)	
	Ранжированный по значимости геохимический ряд парных коэффициентов корреляции Au с основными элементами-спутниками	As ^{+0.72} Te ^{+0.32} Hg ^{+0.30} Sb ^{+0.23}	

терригенных и карбонатно-терригенных пород. Складчатость и метаморфизм зеленосланцевой фации, протекавшие с активным выделением тепла, приводили к высвобождению метеорных (седиментационных) вод, их нагреву и превращению в термоградиентном поле в легкоподвижные средне-низкотемпературные гидротермальные растворы, рудоносность которых и их химический состав (насыщенность прежде всего летучими компонентами – H₂S, CO₂, метаном и его производными), скорее всего, определялась петрохимическим

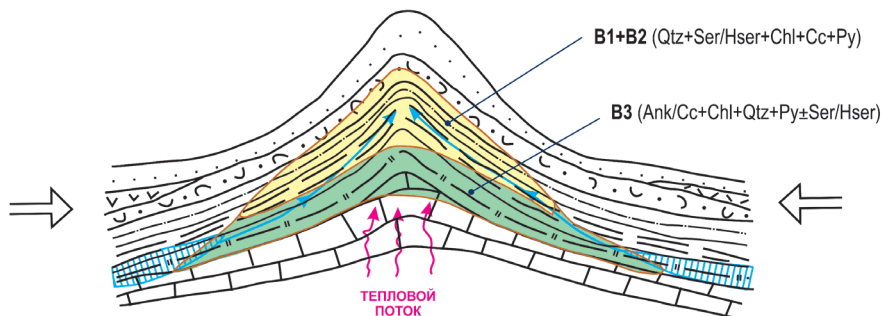
составом и геохимической специализацией углеродсодержащих осадочных пород кординской свиты. Золотоносные березиты, сформировавшиеся в результате этих процессов, скорее всего имели раннерифейский возраст.

На четвертом этапе в результате внедрения крупных масс гранитоидов позднерифейского возраста за счет продольного сжатия в межгранитных блоках вмещающих осадочных пород произошло проявление регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, приведшего

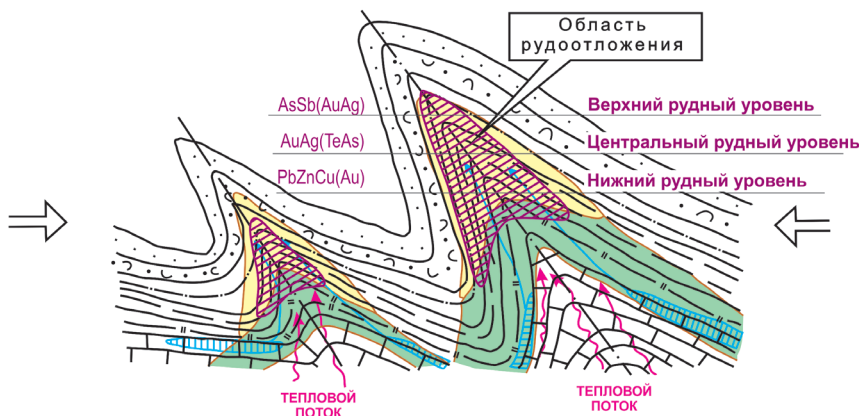
Этап I. Осадконакопление, диагенез, формирование геохимического ресурса золота и сопутствующих элементов в обводненных вмещающих углеродистых кремнисто-терригенных породах



Этап II. Катагенез, региональный метаморфизм зеленосланцевой фации, начало складкообразования и проявления гидротермальной деятельности, обусловленной активизацией и превращением седиментационных (вадозных) вод осадочных пород в гидротермальные растворы



Этап III. Образование складчато-надвигового сооружения, внедрение малых тел гранитоидов, функционирование напорной тектоногенно-метаморфогенной гидротермальной рудоформирующей системы, возникновение вертикальной гидротермально-метасоматической и рудно-геохимической зональности



Этап IV. Внедрение крупных масс гранитоидов. Проявление за счет продольного сжатия в межгранитных блоках вмещающих пород регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, приведшего к преобразованию терригенно-осадочных пород в кристаллические сланцы и мрамора, а минеральных парагенезисов золотоносных березитов ($Qtz+Ser+Cc+Chl+Py, Apy$) – к замещению метаморфическими минеральными ассоциациями, более устойчивыми в повышающихся P-T условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма: $Ms+Bt+Grt+Cord$ +маргарит+хлоритоид+пирротин



Рис. 9. Схематическая геолого-генетическая модель формирования гидротермально-метасоматической и рудно-геохимической зональности Олимпиадинского месторождения

к преобразованию углеродсодержащих кремнисто-терригенных и терригенно-карбонатных пород в кристаллические сланцы и мраморы, а минеральных парагенезисов золотоносных березитов-серицитолитов – к замещению метаморфическими минеральными ассоциациями, более устойчивыми в повышающихся Р-Т условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма: мусковит + биотит + гранат + пирротин ± ставролит, кордиерит, маргарит, хлоритоид, амфибол, клинопироксен, ортоклаз, цоизит и др.

Региональный метаморфизм умеренных давлений эпидот-амфиболитовой фации, о котором идет речь, проявился в позднем рифее и был обусловлен или внедрением гранитоидов аяхтинского комплекса (760–750 млн лет), или коллизийным метаморфизмом, связанным с интенсивными дислокациями и деформациями, которые сопровождали развитие Панимбинского надвига северо-западного простирания. Возраст коллизийного метаморфизма, определенный ^{40}Ar - ^{39}Ar методом, не древнее 848–851 млн лет [8]. Более поздний, «постберезитовый» метаморфизм существенно изменил облик золоторудных березитов, превратив их большей частью, в метаморфические сланцы.

Кроме того, в непосредственной близости с гранитоидными массивами на ранее березитизированные и метаморфизованные в условиях эпидот-амфиболитовой фации породы накладывались минеральные парагенезисы плутогенного генезиса – скарны, скарноиды и штокверковые кварц-серицит-турмалиновые метасоматиты, которые приводили к усложнению минерального состава руд и околорудных метасоматитов, а также их геохимических характеристик.

Выводы прогнозно-минерагенического характера. На основе обобщения всех вышерассмотренных материалов может быть предложена совокупность гидротермально-метасоматических и геохимических критериев прогнозной оценки Олимпиадинской площади на стратиформное золото-сульфидное оруденение орогенного типа.

Гидротермально-метасоматические критерии. В качестве последних может быть использован факт широкого проявления на рассматриваемой территории процессов околорудной березитизации–серицитолитизации и особенно их карбонатсодержащих фаций В2 и В3 с количественными параметрами интенсивности проявления – от 5 до 70% (в среднем – 15–25%) и в качестве минерала-индикатора золоторудной минерализации в березитах-серицитолитах – марганцовистого карбоната с количественными параметрами, варьирующими от 2 до 30% (в среднем – 10–15%).

В минералого-петрографическом отношении околорудные березиты-серицитолиты фаций В2 и В3 на Олимпиадинской площади несут в себе все признаки, характерные для околорудных гидротермалитов, так называемых «областей разгрузки» тектоногенно-метаморфогенных орогенных рудоформирующих гидротермальных систем, про-

явленных на большинстве месторождений золото-сульфидного и кварц-золото-сульфидного геолого-промышленного типов: Наталкинское, Павлик, Дегдекан, Сухой Лог, Голец Высочайший, Олимпиадинское, Благодатное, Дрожное, Ветринское, Неждановское, Майское, Бакырчик, Суздальское, Кумтор, Амантайтау, Даугызтау, Высоковольтное, Кокпатас, Кумак, Светлинское др.

Факт того, что на ореолы околорудной березитизации–серицитолитизации на месторождениях Олимпиадинской площади накладываются минеральные парагенезисы кварц-мусковит-биотит-гранатового состава с примесью хлоритоида, маргарита, ставролита, кордиерита, амфибола, клинопироксена, ильменита, пирротина и других более редких минералов, сформированных в условиях регионального метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, в значительной степени затрудняет диагностику этих гидротермально-метасоматических образований на макроскопическом уровне. Их изучение, к сожалению, может быть построено только на основе анализа эпигенетической минерализации в петрографических шлифах.

Геохимические критерии. Процессы гидротермально-метасоматического изменения рудовмещающих пород кординской свиты в пределах всех четырех изученных месторождений сопровождалась многократным (по сравнению с фоном) привнесом в среду минералообразования таких элементов-индикаторов, как Au, As, Te, Sb и Hg. Комбинацию из этих пяти элементов, особенно когда они сокоррелированы друг с другом и образуют высококонтрастные положительные геохимические аномалии, можно рассматривать в качестве одного из главных геохимических маркеров или индикаторов стратиформной золоторудной минерализации Олимпиадинского типа.

При этом обобщенная интегральная геохимическая формула, отражающая уровень концентрации элементов-примесей в ходе формирования березитов-серицитолитов фаций В2 + В3, выглядит следующим образом: $\text{As}_{+1800} \text{Au}_{+1500} \text{Sb}_{+500} \text{Hg}_{+300} \text{Te}_{+250} (\text{Mn}_{+90} \text{Bi}_{+80} \text{Ag}_{+40} \text{Co}_{+30} \text{Cu}_{+30} \text{La}_{+25})$.

Поэтому сочетание ореолов березитизации–серицитолитизации, контролирующей размещение в пространстве стратиформной золото-сульфидной минерализации, с близкими им по морфологии мультипликативными положительными геохимическими аномалиями AuAsTeSbHg состава, может быть использовано в качестве соответственно *гидротермально-метасоматических* и *геохимических критериев* прогнозирования золото-сульфидной рудной минерализации на территории Олимпиадинской площади.

Изучение гидротермально-метасоматической зональности, особенно на территории Олимпиадинского месторождения, показало, что восточный фланг месторождения эродирован в значительно меньшей степени по сравнению с центральной и западной частями месторождения. На основе этого можно прийти к выводу о том, что в первом приближении вертикальная рудно-геохимическая зональность Олимпиадинского месторождения

должна выглядеть следующим образом (от нижнерудных уровней к центрально-рудным и верхнерудным уровням в направлении вектора максимальной геохимической изменчивости): **CuCoAu(WBi) → AuAsTe → SbHg(Au)**, что может быть использовано для оценки уровня эрозионного среза различных частей рудоформирующей золотоносной гидротермально-метасоматической системы Олимпиадинского типа.

За помощь в организации и проведении полевых работ, а также за предоставленные материалы по геологии Олимпиадинского месторождения авторы выражают свою искреннюю признательность И. О. Лебедеву (Институт Карпинского), Р. Р. Виснапу, В. В. Журавлеву, С. С. Ильину и Р. Г. Шарипову (АО «Полюс Красноярск»), а также С. Г. Лобову, Г. Л. Вурсию, Е. А. Никитину и А. П. Харлашину (ООО «УК Полюс»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верниковский В. А., Верниковская А. Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 35–52.
- Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 7. Алтай-Саянский и Забайкало-Верхнеамурский регионы. Кн. 1. Алтай, Саяны, Енисейский кряж. – Л.: Недра, 1988. – 300 с.
- Григоров В. Т. Крупнейшие золоторудные месторождения Енисейского кряжа и Кузнецкого Алатау и их экономическая оценка с позиции стратиформного рудообразования. – М.: Научный мир, 2003. – 167 с.
- Зоненшайн Л. П., Кузьмин М. И., Натапов Л. М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Т. 1. – М.: Недра, 1990. – 328 с.
- Колмаков Ю. В., Сазонов А. М. Реконструкция петрофизической зональности месторождения Благодатное в Енисейском кряже: геодинамический физико-химический аспекты // Литосфера. – 2022. – Т. 22, № 5. – С. 667–693.
- Константинов М. М. Глубинное строение и закономерности размещения месторождений Северо-Енисейского золоторудного района (Россия) / М. М. Константинов, Р. Ф. Данковцев, Г. С. Симкин, С. В. Черкасов // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, № 5. – С. 425–436.
- Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы учения о магматогенных рудных месторождениях. – М.: АН СССР, 1955. – С. 332–452.
- Лиханов И. И. Неопротерозойский возраст коллизионного метаморфизма в Заангарье Енисейского кряжа (по ^{40}Ar - ^{39}Ar данным) / И. И. Лиханов, П. С. Козлов, О. П. Полянский, Н. В. Попов, В. В. Ревердатто и др. // Докл. РАН. – 2007. – Т. 412, № 6. – С. 799–803.
- Лиханов И. И. Неопротерозойский дайковый пояс Заангарья Енисейского кряжа как индикатор процессов растяжения и распада Родины / И. И. Лиханов, В. В. Ревердатто, П. С. Козлов, С. В. Зиновьев // Докл. РАН. – 2013. – Т. 450, № 6. – С. 685–690.
- Малич Н. С. Енисейская складчато-надвиговая система. Восточная Сибирь. Геология и полезные ископаемые Сибири. В 6-ти томах / Н. С. Малич, А. Л. Качевский, Е. К. Ковригина, А. К. Мкртычян; гл. ред. В. П. Орлов; ред. Н. С. Малич. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2002. – С. 103–107.

11. Метасоматизм и метасоматические породы / ред. В. А. Жариков, В. Л. Русинов. – М.: Научный мир, 1998. – 492 с.
12. Ножкин А. Д., Качевский Л. К., Дмитриева Л. В. Нижнепротерозойская рифтогенная метариолит-базальтовая ассоциация Глушихинского прогиба (Енисейский кряж): петрогеохимический состав, возраст и условия образования // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 58–71.
13. Петров В. Г. Золото в опорных разрезах верхнего докембрия западной окраины Сибирской платформы // Тр. Ин-та геологии и геофизики. Вып. 320. – Новосибирск: Наука, 1976. – 215 с.
14. Плющев Е. В. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований / Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, В. В. Шатов, Г. М. Беляев. – Л.: Недра, 1981. – 262 с.
15. Плющев Е. В., Шатов В. В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. – Л.: Недра, 1985. – 247 с.
16. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // Тр. ВСЕГЕИ. Нов. серия. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – Т. 354. – 560 с.
17. Холодов В. Н. Постседиментационное преобразование в элизионных бассейнах (на прим. Предкавказья) // Тр. ГИН АН СССР. Вып. 372. – М.: Наука, 1983. – 151 с.
18. Черкасов С. В. Глубинное строение Енисейского кряжа и распределение золотого оруднения // Докл. РАН. – 1999. – Т. 368, № 4. – С. 522–524.
19. Щербань И. П. Условия образования низкотемпературных околорудных метасоматитов (на примере Алтай-Саянской области) / отв. ред. академик В. А. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 1975. – 200 с.
20. Sazonov A. M. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia / A. M. Sazonov, K. V. Lobanov, E. A. Zvyagina, S. I. Leontiev, S. A. Silyanov, N. A. Nekrasova, A. Y. Nekrasov, A. B. Borodushkin, V. A. Poperekov, V. V. Zhuravlev, S. S. Ilyin, Yu. A. Kalinin, A. A. Savichev, and A. S. Yakubchuk // Economic Geology. – 2020. – No. 23. – Pp. 203–226.

REFERENCES

1. Vernikovskiy V. A., Vernikovskaya A. E. Tektonika i evolyutsiya granitoidnogo magmatizma Eniseyskogo kryazha [Tectonics and evolution of granitoid magmatism of the Yenisei ridge]. *Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no 1, pp. 35–52.
2. Geologicheskoe stroenie SSSR i zakonornosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh. Vol. 7. Altai-Sayanskiy i Zabaykalo-Verkhneamurskiy regiony. Kn. 1. Altai, Sayany, Eniseyskiy kryazh [The geological structure of the USSR and the patterns of distribution of minerals. Vol. 7. Altai-Sayan and Transbaikal-Upper Amur regions. Kn. 1. Altai, Sayan Mountains, Yenisei Ridge]. Leningrad, Nedra, 1988, 300 p.
3. Grigorov V. T. Krupneyshie zolotorudnye mestorozhdeniya Eniseyskogo kryazha i Kuznetskogo Alatau i ikh ekonomicheskaya otsenka s pozitsii 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, Scientific World, 2003, 167 p.
4. Zonenshine L. P., Kuzmin M. I., Natapov L. M. Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR. Vol. 1 [Tectonics of lithospheric plates of the territory of the USSR. Vol. 1]. Moscow, Nedra, 1990, 328 p.
5. Kolmakov Yu. V., Sazonov A. M. Rekonstruktsiya petrofizicheskoy zonal'nosti mestorozhdeniya Blagodatnoe v Eniseyskom kryazhe: geodinamicheskii fiziko-khimicheskii aspekty [Reconstruction of the petrophysical zoning of

the Blagodatnoye field in the Yenisei ridge: geodynamic physico-chemical aspects]. *Lithosphere*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 667–693.

6. Konstantinov M. M., Dankovtsev R. F., Simkin G. S., Cherkasov S. V. Glubinnoe stroenie i zakonomernosti razmeshcheniya mestorozhdeniy Severo-Eniseyskogo zolotorudnogo rayona (Rossiya) [Deep structure and patterns of placement of deposits of the Severo-Yenisei gold ore region (Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 1999, vol. 41, no. 5, pp. 425–436.

7. Korzhinsky D. S. Ocherk metasomaticheskikh protsessov [Essay on metasomatic processes]. *The main problems of the doctrine of magmatogenic ore deposits*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1955, pp. 332–452.

8. Likhanov I. I., Kozlov P. S., Polyansky O. P., Popov N. V., Reverdatto V. V. et al. Neoproterozoyskiy vozrast kolizionnogo metamorfizma v Zaangar'e Eniseyskogo kryazha (po ^{40}Ar - ^{39}Ar dannym) [Neoproterozoic age of collision metamorphism in the Transangara of the Yenisei Ridge (according to ^{40}Ar - ^{39}Ar data)]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2007, vol. 412, no. 6, pp. 799–803.

9. Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S., Zinoviev S. V. Neoproterozoyskiy daykovyy poyas Zaangar'ya Eniseyskogo kryazha kak indikator protsessov rastyazheniya i raspada Rodini [Neoproterozoic dike belt of the Transangara Yenisei ridge as an indicator of the processes of stretching and decay of Rodinia]. *Reports of the Academy of Sciences*, 2013, vol. 450, no. 6, pp. 685–690.

10. Malich N. S., Kachevsky A. L., Kovrigina E. K., Mkrtychyan A. K. Eniseyskaya skladchato-nadvigovaya sistema. Vostochnaya Sibir'. Geologiya i poleznye iskopayemye Sibiri. V 6-i tomakh [Yenisei folded-thrust system. Eastern Siberia. Geology and minerals of Siberia. In 6 volumes]. Eds. by V. P. Orlov, N. S. Malich. St. Petersburg, VSEGEI Publishing House, 2002, pp. 103–107.

11. Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks]. Ed. V. A. Zharikov, V. L. Rusinov. Moscow, Nauchnyi mir, 1998, 492 p.

12. Nozhkin A. D., Kachevsky L. K., Dmitrieva L. V. Nizhneproterozoyskaya riftogennaya metariorit-bazal'tovaya assotsiatsiya Glushikhinskogo progiba (Eniseyskiy kryazh): petrogeokhimicheskiy sostav, vozrast i usloviya obrazovaniya [Lower Proterozoic rift metariorite-basalt association of the Glushikhinsky trough (Yenisei ridge): petrogeochemical

composition, age and conditions of formation]. *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 1, pp. 58–71.

13. Petrov V. G. Zoloto v opornykh razrezakh verkhnego dokembriya zapadnoy okrainy Sibirskoy platformy [Gold in the reference sections of the Upper Precambrian of the western margin of the Siberian platform]. *Tr. Institute of Geology and Geophysics*, vol. 320. Novosibirsk, Nauka, 1976, 215 p.

14. Plyushchev E. V., Ushakov O. P., Shatov V. V., Belyaev G. M. Plyushchev E. V. Metodika izucheniya gidrotermal'no – metasomaticheskikh obrazovaniy [Methods of studying hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra, 1981, 262 p.

15. Plyushchev E. V., Shatov V. V. Geokhimiya i rudonosnost' gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Geochemistry and ore content of hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra, 1985, 247 p.

16. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations]. *Tr. VSEGEI. New series*. St. Petersburg, VSEGEI Publishing House, 2012, vol. 354, 560 p.

17. Kholodov V. N. Postsedimentatsionnoe preobrazovanie v elizionnykh basseynakh (na prim. Vost. Predkavkaz'ya) [Post-sedimentation transformation in elysion basins (approx. East Ciscaucasia)]. *Tr. Academy of Sciences of the USSR, Geol. In-t*, vol. 372. Moscow, Nauka, 1983, 151 p.

18. Cherkasov S. V. Glubinnoe stroenie Eniseyskogo kryazha i raspredelenie zolotogo orudneniya [Deep structure of the Yenisei ridge and distribution of the golden mineralization]. *Reports of the Academy of Sciences*, 1999, vol. 368, no. 4, pp. 522–524.

19. Shcherban I. P. Usloviya obrazovaniya nizkotemperaturnykh okolorudnykh metasomatitov (na primere Altae-Sayanskoy oblasti) [Conditions for the formation of low-temperature near-ore metasomatites (on the example of the Altai-Sayan region)]. Ed. by Academician V. A. Kuznetsov. Novosibirsk, Nauka, 1975, 200 p.

20. Sazonov A. M., Lobanov K. V., Zvyagina E. A., Leontiev S. I., Silyanov S. A., Nekrasova N. A., Nekrasov A. Y., Borodushkin A. B., Poperekov V. A., Zhuravlev V. V., Ilyin S. S., Kalinin Yu. A., Savichev A. A., Yakubchuk A. S. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia. *Economic Geology*, 2020, no. 23, pp. 203–226.

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр ПМИ. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Кашин Сергей Васильевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Центр ПМИ. <sergey_kashin@vsegei.ru>

Белова Валентина Николаевна – ст. науч. сотрудник, Центр ПМИ. <valentina_belova@vsegei.ru>

Афанасьева Елена Николаевна – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, Центр ПМИ. <elena_afanasieva@vsegei.ru>

Михайлов Виталий Алексеевич – ст. науч. сотрудник, Центр ПМИ.

Shatov Vitaly Vitalievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre for Predictive Metallogenic Studies. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Kashin Sergey Vasilievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Department of Metallogeny and Geology of Mineral Deposits, Centre for Predictive Metallogenic Studies. <sergey_kashin@vsegei.ru>

Belova Valentina Nikolaevna – Senior Researcher, Department of Metallogeny and Geology of Mineral Deposits, Centre for Predictive Metallogenic Studies. <valentina_belova@vsegei.ru>

Afanasieva Elena Nikolaevna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Department of Geology of Uranium Deposits and Radioecology, Centre for Predictive Metallogenic Studies. <elena_afanasieva@vsegei.ru>

Mikhailov Vitaly Alekseevich – Senior Researcher, Department of Metallogeny and Geology of Mineral Deposits, Centre for Predictive Metallogenic Studies.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Институт Карпинского). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (Karpinsky Institute). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.