

Флюидный режим формирования Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения

Методами микротермометрии и КР-спектроскопии газовых и газовой-жидких включений в кварце определены *PTX*-параметры флюидов, сформировавших Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение. Слабо-золотоносные метаморфогенные пирротин-кварцевые прожилки образовались при участии окисленного ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$) азотно-углекислотного флюида при температурах 410–360 °С и давлении $2,4 \pm 0,2$ кбар. Золото-арсенопиритовая минерализация была сформирована глубинным восстановленным ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$) метан-углекислотно-азотным флюидом в интервале температур 360–300 °С при давлении $1,2 \pm 0,1$ кбар, золото-антимонитовая – азотно-метановым флюидом при температурах 290–240 °С и давлении $0,8 \pm 0,1$ кбар. Рудообразование протекало в гетерогенной среде при активном участии газовой фазы в качестве транспортирующего агента.

Ключевые слова: Олимпиадинское месторождение, флюидные включения, температура, давление, состав флюидов.

КРЯЖЕВ СЕРГЕЙ ГАВРИЛОВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела, s34@mail.ru

БЕРКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ, инженер 1 категории

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

Fluid regime of Olimpiada gold deposit formation

S. G. KRYAZHEV, E. M. BERKOVSKY

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

The *PTX*-parameters of the fluids formed the Olimpiada gold deposit were determined using microthermometry and Raman spectroscopy of carbonic ($\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-CH}_4$) and aqueous-carbonic inclusions in quartz. Weakly gold-bearing metamorphic pyrrhotite-quartz veinlets were formed by oxidized ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$) nitrogen-carbon dioxide fluid at temperatures of 410–360 °C and a pressure of $2,4 \pm 0,2$ kbar. Gold-arsenopyrite mineralization was formed by deep-seated reduced ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$) methane-carbon dioxide-nitrogen fluid in the temperature range of 360–300 °C and pressure of $1,2 \pm 0,1$ kbar. Gold-antimonite mineralization was formed by nitrogen-methane fluid at temperatures 290–240 °C and pressure $0,8 \pm 0,1$ kbar. Gold transport was carried out in a boiling environment in carbonic phase.

Key words: Olimpiada deposit, fluid inclusions, temperature, pressure, composition of fluids.

Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение – самый крупный золоторудный объект Енисейского кряжа и один из крупнейших в России ($\text{Au} > 1,5$ тыс. т, по [20]). Перспективы обнаружения аналогичных золоторудных месторождений как в пределах Енисейской провинции, так и в других районах нашей страны определяют необходимость анализа условий формирования

подобных уникальных скоплений рудного вещества. С момента открытия в 1975 году и вплоть до настоящего времени ведутся интенсивные исследования Олимпиадинского месторождения. В монографиях и многочисленных научных статьях подробно охарактеризованы минералого-геохимические особенности оруденения и геолого-структурные условия его локализации [7, 10, 20, 21 и др.].

Методами изотопной геохронологии определена последовательность развития рудообразующих процессов (табл. 1).

Тем не менее некоторые аспекты, касающиеся генезиса месторождения, всё ещё требуют дополнительного изучения. В первую очередь, к ним относятся параметры флюидного режима рудообразования, такие как состав и вероятные источники рудоносных растворов на каждой стадии минерализации, механизмы их движения, давление при рудообразовании.

Проблемы, возникающие при решении указанных вопросов, обусловлены двумя главными причинами. Первая связана с отсутствием жильного кварца в составе продуктивной минерализации, которая представлена рассеянной вкрапленностью золотоносного арсенопирита во вмещающих породах, а также прожилками и вкрапленностью антимонита-бертьерита. Соответственно, классический метод анализа первичных флюидных включений в жильном кварце разных стадий в данном случае неприменим, необходимую информацию

1. Последовательность геологических событий при формировании Олимпиадинского золоторудного месторождения

Геологическое событие	Датированные образования (метод определения)	Изотопный возраст, млн лет	Ссылки
Осадконакопление	Метапелиты (Sm-Nd), кластогенные цирконы (U-Pb)	1450	[20]
Региональный метаморфизм низких давлений	Биотит (Ar-Ar)	970–950	[8]
Кристаллизация коллизионных гранитоидов Тейского комплекса (в т.ч. Чиримбинского и Тырадинского массива)	Циркон (U-Pb)	890–860	[2, 19]
Зональный контактовый метаморфизм	Биотит (Ar-Ar)	860–850	[8]
Коллизионный метаморфизм умеренных давлений в связи с надвигами западного направления	Биотит (Ar-Ar)	850–830	[8]
Коллизионный метаморфизм умеренных давлений в связи с надвигами восточного направления	Биотит (Ar-Ar)	800–780	[8]
Кристаллизация мусковита в рудах Олимпиадинского месторождения	Мусковит (Ar-Ar, Rb-Sr)	810–780	[3, 10]
Кристаллизация мусковита в рудах золото-кварцевого месторождения Советское	Мусковит в ассоциации с самородным золотом (Ar-Ar)	820–780	[9]
Кристаллизация постколлизионных гранитоидов Аяхтинского комплекса	Циркон (U-Pb)	760–750	[2]
Внедрение даек субщелочных-щелочных основных пород	Циркон, сфен (U-Pb)	710–700	[11, 19]
Кристаллизация тонкоиглычатого высокозолотоносного арсенопирита (Олимпиадинское месторождение)	Арсенопирит (Re-Os)	689 ± 28	[19]
Формирование золото-сурьмяной (антимонит-бертьеритовой) минерализации	Мусковит (Ar-Ar)?	680–660	[3, 11, 19]
Внедрение даек щелочно-ультраосновных пород, карбонатитов, формирование щелочных метасоматитов	Биотит, порода (K-Ar), флогопит (Rb-Sr)	670–650	[11, 19]

можно получить только путём изучения различных генераций вторичных включений в дорудном кварце.

Вторая проблема обусловлена многокомпонентным составом газовой фазы рудообразующих флюидов. В результате исследования газовых включений в минералах Олимпиадинского месторождения методами криометрии или КР-спектроскопии (Раман-спектроскопии) установлено [3, 14], что они содержат смеси CO_2 , N_2 и CH_4 с очень широким диапазоном соотношений компонентов. При комнатной температуре включения находятся в гомогенном состоянии. Для определения их плотности (а следовательно, и давления при рудообразовании) необходимо привлечение метода криометрии, основанного на измерении температур фазовых переходов во включениях после их глубокого охлаждения и гетерогенизации. В рассматриваемом случае при низких температурах во включениях наблюдаются три фазы – твёрдая CO_2 , газообразный флюид $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ и жидкий флюид $\text{CH}_4 + \text{N}_2$. Гетерогенные равновесия в многофазных многокомпонентных системах описываются фундаментальным правилом фаз, согласно которому C (число степеней свободы) = K (число компонентов) + 2 – Φ (число фаз). При наличии трёх фаз в трёхкомпонентной системе для её полного описания требуется независимое определение двух параметров (температуры гомогенизации и состава газовой смеси). Поэтому оценка плотности флюидных включений в кварце Олимпиадинского месторождения только методом криометрии принципиально невозможна, состав газов в каждом включении должен быть определен количественно методом КР-спектроскопии. В этом состоит основная причина большого разброса опубликованных для месторождения оценок давления (в целом от 0,3 до 3 кбар) при незакономерных его вариациях [3, 14, 20, 21].

Таким образом, решение обозначенной проблемы возможно только путём комплексного анализа включений методами криометрии и КР-спектроскопии, который может обеспечить точное определение плотности (мольного объёма) трёхкомпонентных газовых смесей. При этом следует отдельно подчеркнуть, что в связи с переменным составом флюида комплексному исследованию необходимо подвергать строго одно и то же включение. Данный подход и положен в основу нашей работы.

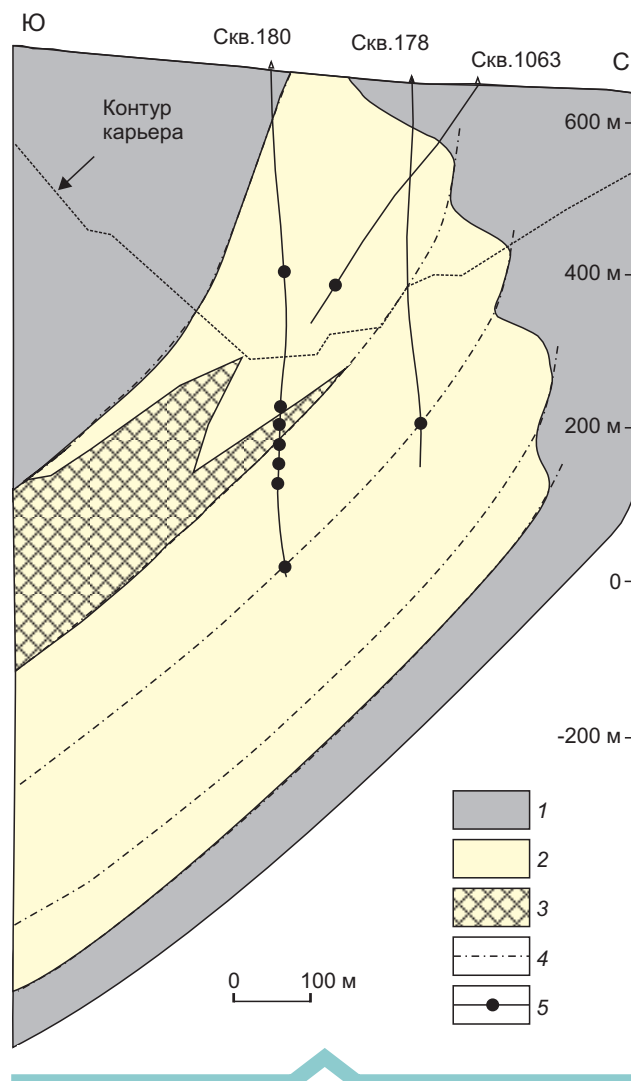


Рис. 1. Разрез Восточного участка Олимпиадинского месторождения. По [10, 20]:

1 – углеродистые кварц-слюдистые сланцы; 2 – рудное тело № 4: минерализованные слюдисто-кварц-карбонатные и кварц-карбонатные породы; 3 – золото-сурьмяные руды без арсенопирита; 4 – разрывные нарушения; 5 – точки отбора образцов

Каменный материал и методы исследования.

Для изучения флюидных включений использованы 10 образцов руд Олимпиадинского месторождения из эталонной коллекции, хранящейся в ЦНИГРИ. Девять из них характеризуют оруденение Восточного участка (скважины 180, 178 и 1063), в пределах которого сосредоточены 90% запасов месторождения (рис. 1). Оруденение Западного участка представлено одним образцом (скв. 622/127).

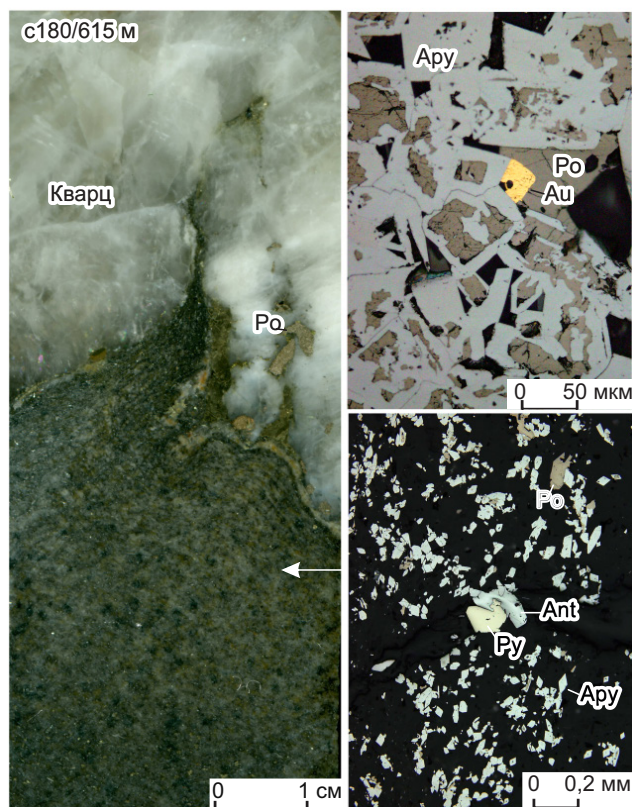


Рис. 2. Золото-сульфидная минерализация в рудах Олимпиадинского месторождения:

образец № с180/615; минералы: Ару – арсенопирит, Ро – пирротин, Апт – антимонит, Ру – пирит, Ау – самородное золото

Изученные образцы руд (рис. 2) типичны для месторождения и преимущественно представляют собой слюдисто-кварц-карбонатные метапоороды, содержащие пирротин-мусковит-кварцевые прожилки, тонкую сульфидную вкрапленность (арсенопирит, пирротин, спорадически пирит и антимонит), прожилки антимонита. Наблюдаемые в образцах взаимоотношения рудных минералов (замещение пирротина золотоносным арсенопиритом, который в свою очередь замещается антимонитом) полностью соответствуют существующим представлениям о последовательности минералообразования на Олимпиадинском месторождении [7, 10, 20, 21].

Микротермометрические анализы индивидуальных включений проводились в прозрачно-полированных пластинках с использованием криотермокамеры УМТК+ конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание

препаратов от -180 до $+600$ °C с измерением температур фазовых переходов во включениях посредством хромель-алюмелевой термопары с точностью $\pm 0,2$ °C. Камеру калибровали при температурах тройной точки чистой CO_2 ($-56,6$ °C), температурах плавления льда в стандартных растворах NaCl (от -18 до -1 °C), температурах плавления AgNO_3 (210 °C) и K_2CrO_7 (398 °C).

Все измерения проводились в ходе нагревания препарата. Регистрировались температуры следующих фазовых переходов.

1. Температура гомогенизации азот-метановой смеси, которая происходит преимущественно в жидкую или окологкритическую фазу (путём исчезновения мениска после уменьшения размеров газового пузырька).

2. Температура плавления CO_2 , которая для чистой углекислоты составляет $-56,6$ °C. В изученных образцах CO_2 плавилась при более низкой температуре, что обусловлено присутствием метана и азота.

3. Температура гомогенизации флюида $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$, которая преимущественно происходила в жидкую фазу.

4. Температура полной гомогенизации газожидких включений, которая во всех случаях происходила в жидкую фазу путём исчезновения газового пузырька, то есть растворения газов в воде.

В каждой из присутствующих в образце ассоциаций сингенетических включений были проанализированы по 5–10 индивидуальных вакуолей, полученные данные усреднялись. Затем составы газов в тех же вакуолях были количественно определены методом КР-спектроскопии. Полученные данные также усреднялись.

КР-спектры записывали на автоматическом КР-спектрометре XPloRA (Horiba Scientific), совмещенном с конфокальным микроскопом. Работа выполнена в Микрорамановской лаборатории МГУ им. М. В. Ломоносова на кафедре петрологии геологического факультета. В качестве источника света использовался лазер 532 нм (зелёный). Детектор – матричный ПЗС, охлаждаемый Пельтье элементом до -50 °C. Пространственное разрешение конфокального микроскопа – $0,5$ мкм. Итоговый результат, выдаваемый прибором, представлял собой КР-спектр, усреднённый по результатам двух измерений. Время получения одного спектра составляло 40 секунд. Обработка спектров (вычитание фона и расчёт площадей пиков) осуществлялась в программе DIFWIN1.

Для калибровки КР-спектрометра в качестве стандартов использованы природные включения в кварце из руд Олимпиадинского месторождения, содержащие практически чистые двухкомпонентные системы, параметры которых могут быть определены по температурам гомогенизации с использованием соответствующих диаграмм. По результатам анализа таких включений определены калибровочные коэффициенты, обеспечивающие удовлетворительную сходимость данных криометрии и КР-спектроскопии [1].

Мольный объём V ($\text{см}^3/\text{моль}$) трёхкомпонентных включений рассчитывали по формуле [18]: $V = 1 / (v\text{CO}_2 / 28,2 + (1 - v\text{CO}_2) / V_{\text{CH}_4+\text{N}_2})$, где $v\text{CO}_2$ – объёмная доля твёрдой CO_2 (мольный объём

$28,2 \text{ см}^3/\text{моль}$) в момент гомогенизации фазы $\text{CH}_4 + \text{N}_2$, рассчитанная с учётом мольной доли CO_2 во включении (по данным КР-спектроскопии), $V_{\text{CH}_4+\text{N}_2}$ – мольный объём фазы $\text{CH}_4 + \text{N}_2$, определённый по температуре и типу её гомогенизации с учётом отношения CH_4 / N_2 (по данным КР-спектроскопии) при использовании диаграммы состояния системы $\text{CH}_4\text{-N}_2$.

Результаты исследований. Включения, обнаруженные в изученных образцах жильного кварца, разделяются на два генетических типа [15]:

- первичные, которые встречаются поодиночке либо образуют объёмные изолированные кластеры, расположенные в объёме минерала вне связи с трещинами. Данные включения характеризуют

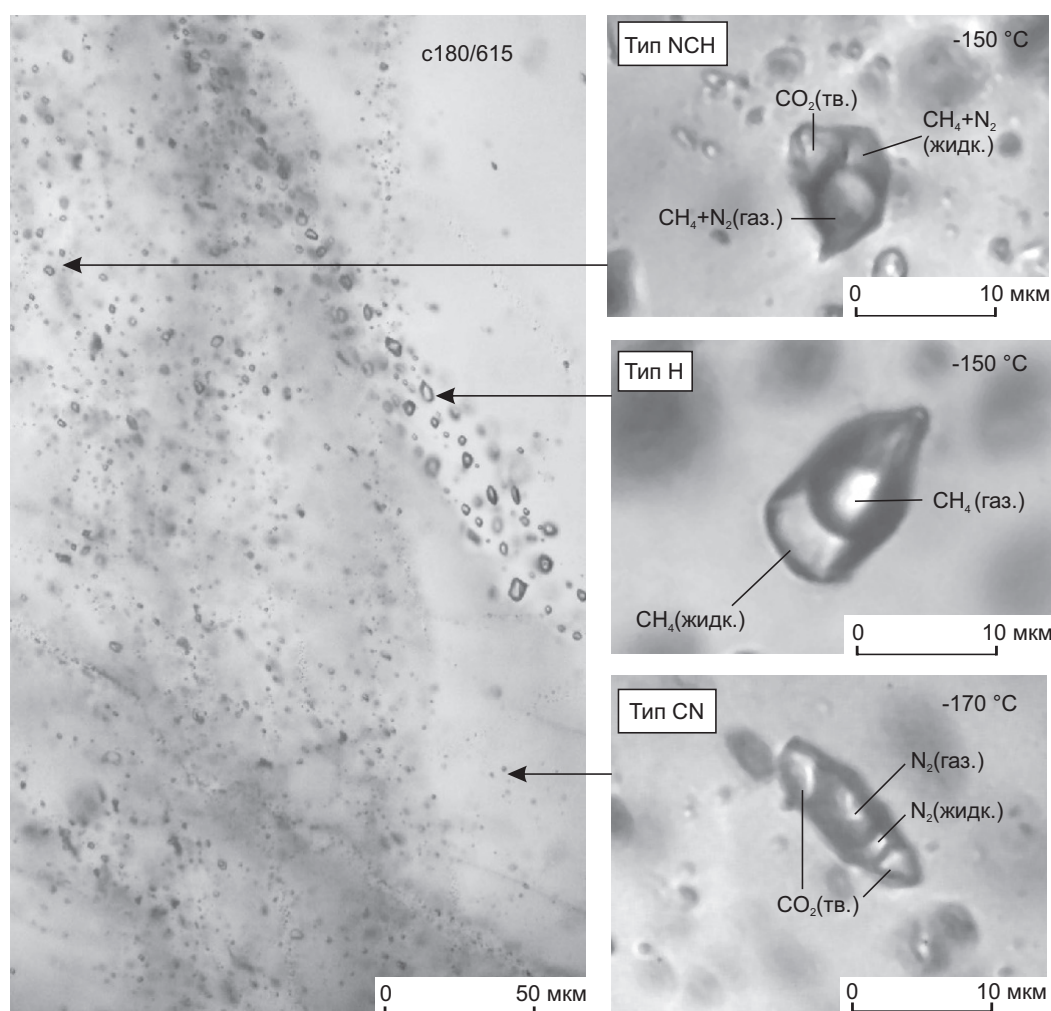


Рис. 3. Три генерации флюидных включений в кварце:

CN – первичные азотно-углекислотные, NCH – вторичные метан-углекислотно-азотные, Н – вторичные метановые (с примесью азота); образец с180/615

условия формирования пирротин-мусковит-кварцевых прожилков;

- вторичные, залечивающие протяженные трещины, пересекающие края зёрен минерала и связанные с более поздними по отношению жильному кварцу минералообразующими процессами. Как показали исследования, существуют как минимум две генерации вторичных включений, которые часто находятся в одном образце и приурочены к разным системам пересекающихся трещин (рис. 3).

Результаты комплексных исследований первичных и вторичных включений приведены в табл. 2 и в графической форме представлены на рис. 4.

Установлено, что включения выделенных генераций значительно различаются по составу газовой фазы и криометрическим характеристикам.

Первичные включения имеют следующий состав (мольн. %): CH_4 – 0,8–5,0, N_2 – 21,3–59,0, CO_2 – 38,5–77,9. По преобладающим компонентам данный тип включений обозначен как «CN». При охлаждении в них вымораживается твёрдая углекислота, которая занимает 22,5–42,5 % объёма вакуолей. Азот-метановая смесь во включениях данного типа гомогенизировалась в жидкую, газовую или критическую фазу при температурах ($T_{\text{гом}} \text{CH}_4 + \text{N}_2$) от -150 до -147 °С. Температуры плавления углекислоты ($T_{\text{пл}} \text{CO}_2$) составили

2. Результаты комплексных термобарогеохимических исследований индивидуальных флюидных включений в жильном кварце Олимпиадинского месторождения

Номер образца	Тип (группа включений)	Состав по данным КР-спектроскопии, мольн. %			Температуры фазовых переходов, °С			V , см ³ /моль	$T_{\text{гом}}$ ГЖВ, °С
		CH_4	N_2	CO_2	$T_{\text{гом}} \text{CH}_4 + \text{N}_2$	$T_{\text{пл}} \text{CO}_2$	$T_{\text{гом}} \text{C}$		
c178/420	NCH(1)	16,2	48,7	35,1	-126,6 ж	-70,1	—	65	310–320
	NCH(2)	28,0	57,9	14,1	-125,0 ж	-73,3	—	64	
	H	94,9	1,9	3,2	—	-94,5	-79,5	79	260–290
c180/215	H	94,5	4,8	0,7	-86,0 ж	—	—	80	240–250
c180/395	CN(1)	3,2	53,2	43,6	-149,0 ж	-61,3	-52,0	49	360–390
	CN(2)	1,1	42,4	56,6	-147,5 ж	-61,0	-45,5	49	
c180/412	H	87,8	8,4	3,8	—	-91,5	-86,3	78	255–265
c180/440	NCH	12,8	60,1	27,1	-132,4 ж	-69,0	—	66	320–350
c180/460	NCH	21,9	49,8	28,4	-124,2 ж	-69,8	—	65	340–360
c180/480	H	95,4	3,4	1,2	-84,5 ж	—	—	80	250–270
c180/615	CN	2,5	59,0	38,5	-150 ж	-61,2	-55,3	49	—
	NCH	25,6	46,1	28,3	-119,2 ж	-65,5	—	65	345–355
	H	94,9	4,6	0,5	-85,5 ж	—	—	80	240–260
c1063/250	NCH	25,6	28,6	45,8	-112,5 г	-64,5	-33,5к	64	300–340
c622/127	CN(1)	5,0	31,5	63,5	-147 к	-62,5	-31,5	51	370–410
	CN(2)	2,4	28,1	69,5	-147,5 г	-60,0	-23,3	49	
	CN(3)	0,8	21,3	77,9	-148 г	-59,2	-11,5	51	
	NCH	34,0	36,7	29,2	-110,0 ж	-63,0	—	65	—
	H	99,0	0,5	0,5	-84,5 ж	—	—	80	235–245

Примечание. Типы газовых включений: CN – первичные азотно-углекислотные, NCH – вторичные метан-углекислотно-азотные, H – вторичные метановые. Измеренные температуры фазовых переходов: $T_{\text{гом}} \text{CH}_4 + \text{N}_2$ – гомогенизации азотно-метановой смеси в жидкую (ж), газовую (г) или критическую (к) фазу; $T_{\text{пл}} \text{CO}_2$ – плавления углекислоты, $T_{\text{гом}} \text{C}$ – гомогенизации флюида $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$ в жидкую фазу (к – в критическую фазу). V – мольный объём флюида, рассчитанный по данным криометрии и КР – спектроскопии по методике [18]. $T_{\text{гом}}$ ГЖВ – температуры гомогенизации газовой-жидких включений, ассоциирующих с газовыми (путём растворения газов в воде). В каждой строке представлены усреднённые данные анализа 5–10 индивидуальных вакуолей, принадлежащих к одной группе сингенетических включений.

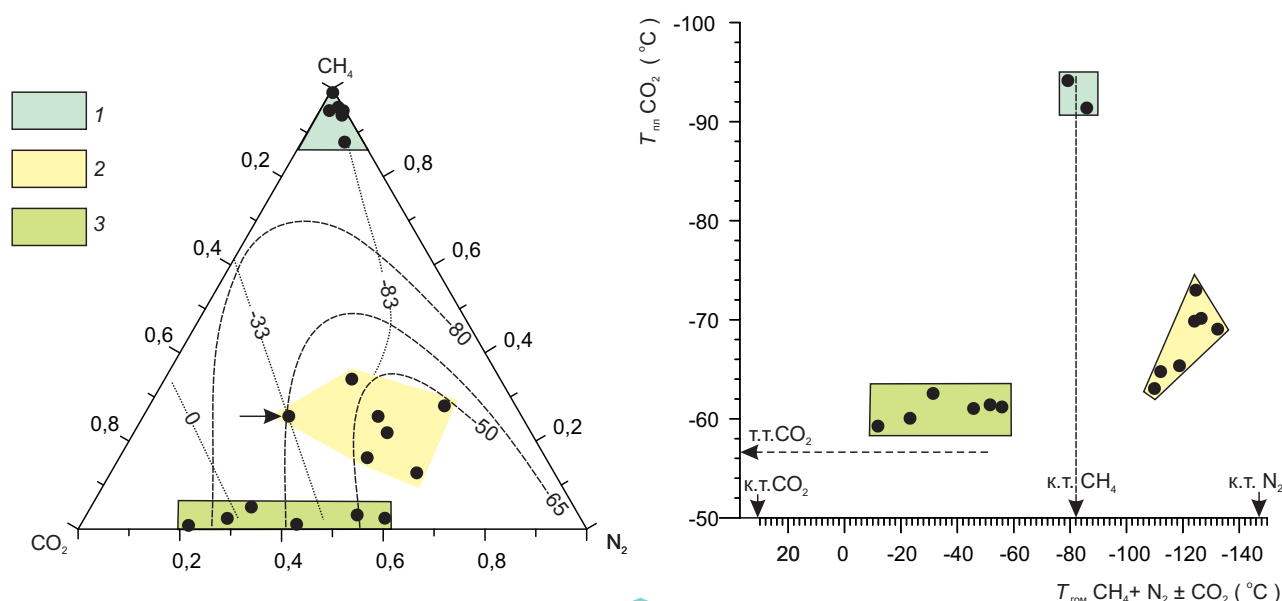


Рис. 4. Состав и криометрические характеристики газовых включений в кварце Олимпиадинского месторождения:

А – данные КР-спектроскопии, пунктирные линии – изохоры, точечные линии – изотермы критических переходов в системе $N_2 + CH_4 + CO_2$ [16]; Б – данные криометрии; к.т. – критическая точка, т.т. – тройная точка, стрелкой показана фигуративная точка, соответствующая образцу с1063/250; тип включений: 1 – Н, 2 – NCH, 3 – CN

-62,5...-59,5 °С. После плавления CO_2 флюид $CO_2 + N_2 + CH_4$ гомогенизировался в жидкую фазу при температурах ($T_{гом}$, °С) -55,3...-11,5 °С. Мольный объём флюида, рассчитанный для первичных включений на основе полученных данных, составляет 49–51 см³/моль.

Вторичные включения, залечивающие позднюю систему прямолинейных трещин, заполнены преимущественно плотным метаном с небольшой примесью азота и углекислоты (мольн. %: CH_4 – 87,8–99,0, N_2 – 0,5–8,4, CO_2 – 0,5–3,8) и обозначены как тип «Н». Флюид во включениях данного типа гомогенизировался в жидкую фазу (но вблизи критической точки) при температурах ($T_{гом} CH_4 + N_2 \pm CO_2$) -86,3...-79,5 °С. Твёрдая углекислота наблюдалась редко и только в наиболее крупных вакуолях в виде небольшого (не более 1–1,5 об. %) кристаллика. Температуры её плавления ($T_{пл} CO_2$) составили -94,5...-85,0 °С. Мольный объём флюида, заключённого во включениях данной генерации, составляет 78–80 см³/моль.

В образце с180/412 включения типа «Н» залечивают трещины вместе с выделениями антимонита (рис. 5). Это даёт основание утверждать, что полученные по ним термобарогеохимичес-

кие данные характеризуют условия формирования позднего продуктивного золото-сурьмяного (бертьерит-антимонитового) минерального комплекса.

Вторичные включения, залечивающие более раннюю систему трещин, в сопоставимых долях содержат все три газовых компонента (мольн. %): CH_4 – 12,8–34,0, N_2 – 28,6–60,1, CO_2 – 14,1–45,8. Такие метан-углекислотно-азотные включения обозначены как тип «NCH». При охлаждении в них вымораживается твёрдая углекислота, которая занимает в вакуолях от 6 до 20 об. %. Азот-метановая смесь во включениях данного типа гомогенизировалась преимущественно в жидкую фазу при температурах ($T_{гом} CH_4 + N_2$) -132,4...-110,0 °С. Температуры плавления углекислоты ($T_{пл} CO_2$) составили -73,3...-63,0 °С. В одной группе включений (обр. с1063/250) после гомогенизации азот-метановой смеси в газовую фазу при -112 °С и плавления углекислоты при -64,5 °С образовался жидкий флюид $CO_2 + N_2 + CH_4$, который гомогенизировался путём исчезновения мениска в критическую фазу при -33,5 °С. Измеренная температура точно соответствует критической для флюида данного состава и плотности (см. рис. 4),

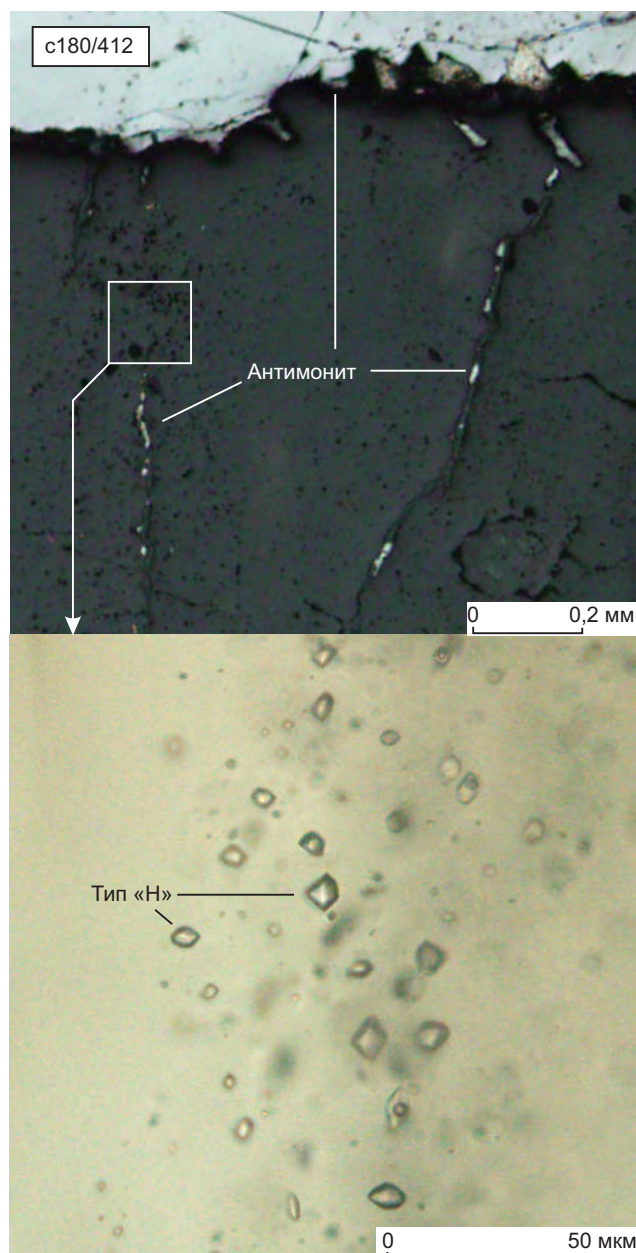


Рис. 5. Флюидные включения в кварце (тип Н), сингенетичные с антимонитом. Фото полированной пластины в отражённом и проходящем свете

что служит дополнительным свидетельством правильности калибровки КР-спектрометра и определения параметров включений, содержащих трёхкомпонентные газовые смеси.

Мольный объём, рассчитанный для вторичных включений типа «NCH», составляет 64–66 см³/моль. Поскольку данная генерация вторичных включений залечивает более раннюю систе-

му трещин, чем включения типа «Н» (см. рис. 3), её вполне обоснованно можно связать со стадией рудообразования, предшествующей отложению антимонит-бертьеритовой минерализации, а именно с формированием вкрапленности золотоносного арсенопирита в породах, вмещающих кварцевые прожилки. Такой вывод согласуется с закономерным присутствием включений аналогичного состава только в зонах развития золото-арсенопиритовой минерализации [3, 14].

Давление при рудообразовании. Как свидетельствуют полученные результаты, при значительных вариациях состава и криометрических показателей газовые включения каждой генерации имеют достаточно строго определённую плотность (мольный объём) и, следовательно, были захвачены при близких *PT*-условиях. Для оценки давления необходимо определить наклон изохоры, характеризующей флюид соответствующего состава и плотности, что было выполнено с использованием программного пакета FLUIDS [17].

Температуру захвата газовых включений можно определить по температурам гомогенизации сингенетичных газовой-жидких включений (см. табл. 2), которые закономерно присутствуют в каждой ассоциации (рис. 6). Для первичных включений типа «CN» эти температуры составляют 410–360 °С, для вторичных типа «NCH» – 360–300 °С, для вторичных типа «Н» – 290–240 °С.

Диапазоны давления, соответствующие отрезкам изохор в указанных температурных интервалах, показаны на рис. 7. Для первичных азотно-углекислотных включений (тип «CN») получены значения 2,6–2,2 кбар (мольный объём 49–51 см³/моль, температуры захвата 410–360 °С). Давления, оценённые по вторичным метан-углекислотно-азотным включениям (тип «NCH»), составили 1,4–1,1 кбар (мольный объём 64–66 см³/моль, температура 360–300 °С), по вторичным метановым включениям (тип «Н») – 0,9–0,7 кбар (мольный объём 78–80 см³/моль, температуры 290–240 °С). Следует отметить, что полученные *PT*-характеристики точно соответствуют условиям минералообразования, так как получены по ассоциациям газовой-жидких и газовых включений, захваченных из гетерогенной минералообразующей среды [15].

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что формирование Олимпиадинского месторождения протекало дискретно в гетерогенной среде при участии углекислотно-

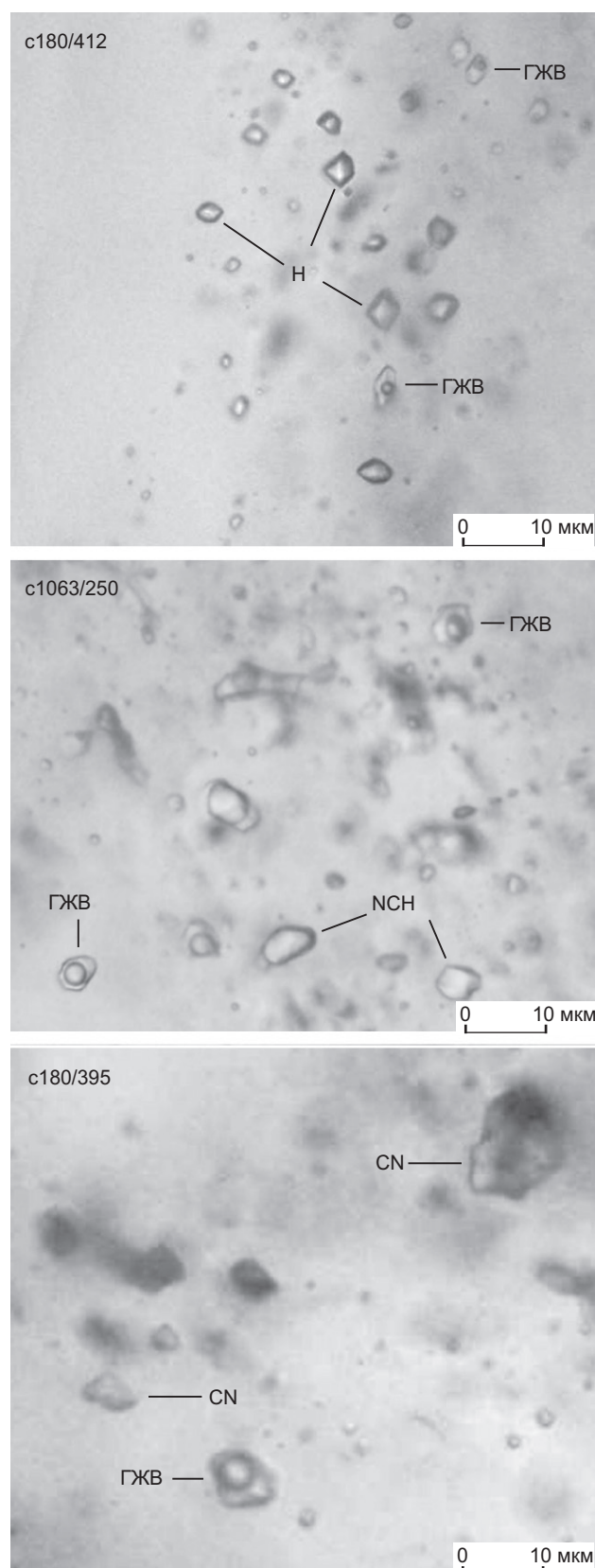


Рис. 6. Ассоциации сингенетических газовых (типы CN, NCH, H) и газовой-жидких (ГЖВ) включений

азотно-метановых флюидов переменного состава на фоне снижения температуры от 410 до 240 °C и скачкообразных изменений давления от 2,4 до 1,2 и далее до 0,8 кбар. В условиях литостатического градиента указанные давления соответствуют глубинам от ~10 до 5–3 км от палео-поверхности.

Обсуждение результатов. В результате исследований установлено, что совмещённые в рудах Олимпиадинского месторождения различные по продуктивности минеральные комплексы были сформированы на разных глубинах при участии флюидов разного состава. Это даёт основание предполагать, что золото поступало в область рудоотложения неоднократно из нескольких источников. Для определения вероятных источников рудного вещества следует рассмотреть существующие геохронологические и изотопно-геохимические данные.

Время образования пирротин-мусковит-кварцевых прожилков с учётом Ar-Ar и Rb-Sr датировок мусковита можно ограничить интервалом 810–780 млн лет (см. табл. 1). При этом необходимо отметить, что нижний предел температур захвата первичных включений в кварце (360 °C) отвечает условиям закрытия K-Ar системы слюд [8].

На Енисейском кряже магматические породы близкого возраста не известны. Согласно существующим представлениям [8], указанный период времени отвечает окончанию коллизионного метаморфизма, связанного с формированием надвигов в Татарско-Ишимбинской системе разломов. В это же время были образованы многочисленные золотоносные кварцевые жилы, которые имеют весьма сложное строение и несут явные признаки метаморфогенного происхождения [9, 11, 13]. В работе [13] убедительно показано, что основным источником рудного вещества золото-кварцевых месторождений на Енисейском кряже могли служить вмещающие углеродисто-терригенные толщи, обогащённые золотом на этапе осадконакопления.

Пирротин-мусковит-кварцевые прожилки, распространённые в рудах Олимпиадинского месторождения, по морфологии также могут быть отнесены к метаморфогенным образованиям (см. рис. 2). Пирротин обогащён тяжёлым изотопом ^{34}S [5, 20] и характеризуется широким диапазоном значений $\delta^{34}\text{S}$ от +6 до +20‰, что указывает на гидротермально-осадочную природу серы [4] и свидетельствует в пользу метаморфогенного

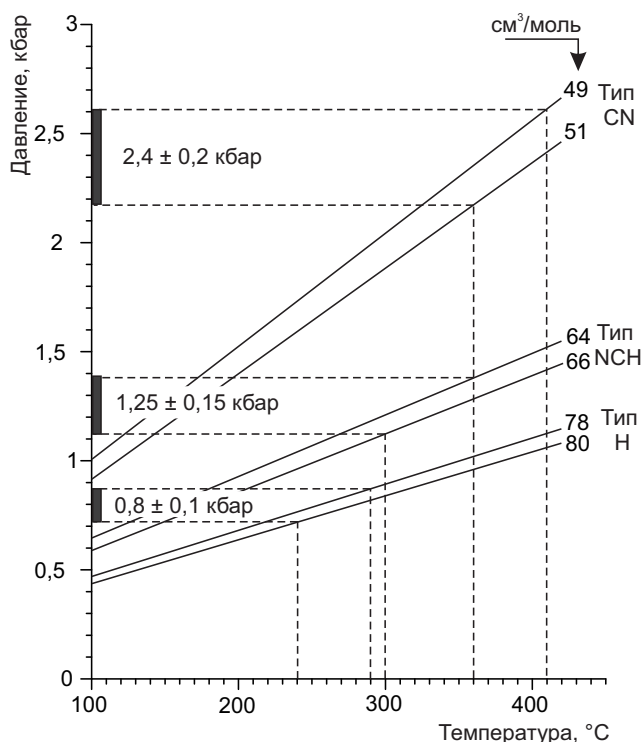


Рис. 7. Оценка давления при захвате флюидных включений в кварце Олимпиадинского месторождения

происхождения пирротин-кварцевой минерализации.

В монофракциях пирротина концентрации золота в среднем составляют 9 г/т (при вариациях от 0,3 до 70 г/т, 118 определений [10]). Среднее содержание пирротина в рудах оценивается в 1,5–3 % [10]. Следовательно, с метаморфогенной минерализацией могут быть связаны не более 5 % от общего количества Au в рудах месторождения (что, однако, составляет 50–100 тонн металла).

Таким образом, изученные первичные включения в кварце, содержащие окисленные азотно-углекислотные флюиды ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$), характеризуют метаморфогенно-гидротермальный этап рудообразования, в течение которого на глубинах около 10 км при температурах 410–360 °C в процессе тектонических движений была сформирована слабозолотоносная прожилково-вкрапленная минерализация.

Основной объем золото-сульфидного оруденения, преимущественно представленного вкрапленностью высокозолотоносного арсенопирита (Au в среднем 100–300 г/т, по [10, 21]) и сурьмя-

ными минералами в парагенезисе с самородным золотом, был сформирован восстановленными флюидами ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4$ от ~1 до 0,01) при более низких температурах (360–240 °C) в обстановке существенно меньших глубин. Значительное снижение давления (от 2,4 до 1,2–0,8 кбар), предшествующее формированию золото-мышьяково-сурьмяных руд, вероятнее всего связано с воздыманием территории, денудацией и уменьшением глубин развития минералообразующих процессов с ~10 до ~5–3 км от палеоповерхности.

Данная оценка хорошо согласуется с существующими геодинамическими реконструкциями [8], согласно которым, в результате надвигов 780 млн лет назад метاپороды рудовмещающей кординской свиты оказались перекрыты метатерригенно-карбонатными толщами тейской серии мощностью 5–7 км. Амплитуда последующего за этим постколлизийного быстрого подъема и эрозии составила не менее чем 4–5 км.

Время формирования золото-сульфидного оруденения (690–660 млн лет) совпадает с возрастом рифтогенных интрузивных комплексов, представленных дайками субщелочных и щелочных пород основного и ультраосновного состава (см. табл. 1), что неоднократно отмечалось в литературе [11, 19 и др.]. На вероятную связь золото-сульфидного оруденения с глубинным магматизмом указывает изотопный состав осмия [19], а также серы в золотоносных сульфидах [4, 5, 20]. Основная масса арсенопирита и антимонита характеризуется узким диапазоном значений $\delta^{34}\text{S} = +4,5 \pm 1 \text{‰}$. Данный факт указывает на единый магматический источник рудных компонентов, входящих в состав золото-сульфидной мышьяково-сурьмяной минерализации Олимпиадинского месторождения. Наиболее вероятно, что таким источником служил длительно эволюционирующий глубинный очаг мантийно-коровой природы.

Здесь следует отдельно подчеркнуть, что сделанный вывод относится исключительно к золоту и его элементам-спутникам (As, Sb, S). Основным источником углекислоты, азота и метана, вероятнее всего, служили углеродисто-терригенные толщи [12]. Имеющиеся определения изотопного состава суммарного углерода включений в кварце ($\delta^{13}\text{C} (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) = -17 \pm 1 \text{‰}$) этому выводу не противоречат [6]. Необходимо также отметить, что азот и метан в системе вода–порода ведут себя по-разному в зависимости от форм нахождения углерода и условий газогенерации,

что приводит к широким вариациям состава пространённых в природе азот-метановых гидротерм [12]. Возможно, этим и обусловлена изменчивость состава газов в рассматриваемых нами рудообразующих флюидных палеосистемах.

В аспекте обсуждаемых процессов возникает резонный вопрос: почему формирование крупнообъёмного золото-сульфидного оруденения не отразилось на изотопных K-Ar и Rb-Sr системах слюд в минерализованных породах? Ответ на него заключён в рассмотренных ниже особенностях флюидного режима рудообразования [6].

На глубинах 3–5 км в условиях литостатического давления движение поровых растворов весьма затруднено. Гидродинамическая связь с поверхностью отсутствует, температурные градиенты весьма незначительны. Как следствие, водно-солевые флюиды находятся практически в неподвижном состоянии. В рассматриваемом случае это подтверждается данными по изотопному составу кислорода. Установлено, что золото-арсенопиритовые руды и безрудные мусковит-кварц-карбонатные породы характеризуются одинаковыми значениями $\delta^{18}\text{O}$ карбонатов ($+21 \pm 1\text{‰}$), что свидетельствует о низком отношении вода/порода в системе.

Как отмечалось всеми исследователями флюидных включений, при формировании руд Олимпиадинского месторождения минералообразующая среда находилась в гетерогенном состоянии. Она была представлена водно-солевым раствором и относительно малоплотной газообразной углекислотно-азотно-метановой фазой. Известно, что в подобных системах происходит разделение химических элементов, причём в газообразную фазу преимущественно перераспределяются такие компоненты, как As, Sb, S и Au. На пузырьки газа в жидкости независимо от внешних условий постоянно действует архимедова сила, поэтому они неизбежно будут двигаться вверх с относительно высокой скоростью. Именно такой механизм мог обеспечить транспорт огромной массы рудного вещества на большие расстояния в условиях глубинного гидродинамического режима. Наблюдаемые широкие вариации составов газовых смесей в сингенетичных включениях (см. табл. 2, рис. 3) также указывают на движение углекислотно-азотно-метанового флюида в виде отдельных пузырьков.

При перманентном гетерогенном состоянии среды между фазами устанавливается устойчивое

равновесие, что подразумевает и постоянство pH и Eh в системе раствор–порода. В этом, на наш взгляд, заключается главная причина отсутствия на Олимпиадинском месторождении сопровождающих арсенопиритовую минерализацию метасоматитов [7], а также арсенопирит-кварцевых прожилков [10, 14].

Вторая причина состоит в щелочном характере восстановленных водно-азотно-метановых флюидов [12]. Очевидно, именно поэтому карбонатные породы не являлись для рудоносных растворов геохимическим барьером и оказались минерализованными практически во всем объёме. Исключение составляют прослои кварц-карбонатных пород и мраморов, сложенных кальцитом, а также прожилки кварца. Арсенопирит (в отличие от антимонита) в них не встречается. Данная закономерность позволяет в качестве одной из главных причин рудоотложения указать наличие в породах железосодержащих минералов (железистых карбонатов и пирротина). По нашему мнению, именно кварц-кальцитовый состав пород в верхней части рудного тела № 4 [20] обусловил локализацию в них золото-антимонитовых руд, не содержащих арсенопирит (см. рис. 1).

Таким образом, сохранность изотопных K-Ar и Rb-Sr систем слюд можно рассматривать как ещё одно доказательство газового транспорта рудного вещества восстановленными флюидами. Состав и плотность включений таких флюидов можно использовать при типизации золоторудных проявлений, определении последовательности рудообразования и прогнозе скрытого оруденения.

В заключение необходимо отметить приуроченность Олимпиадинского месторождения к весьма благоприятной для рудоотложения структуре – крупному телу трещиноватых существенно карбонатных пород, заключённому в чехол слабопроницаемых пластичных углеродисто-слюдистых сланцев (см. рис. 1). Эта своеобразная «ловушка» для газообразных рудоносных флюидов, по-видимому, и обеспечила условия для уникального скопления рудного вещества.

Выводы. В результате выполненных исследований существенно уточнены параметры флюидного режима формирования Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения. На основе комплексного применения методов криометрии и КР-спектроскопии точно определено флюидное давление при образовании разновозрастных минеральных комплексов.

Формирование слабопродуктивного прожилково-вкрапленного пирротин-кварцевого комплекса проходило при участии окисленного ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 10\text{--}100$) азотно-углекислотного флюида при температурах $410\text{--}360^\circ\text{C}$ и давлении $2,4 \pm 0,2$ кбар. Основной продуктивный, вкрапленный золото-арсенопиритовый комплекс был сформирован восстановленным ($\text{CO}_2 / \text{CH}_4 \sim 1$) метан-углекислотно-азотным флюидом в интервале температур $360\text{--}300^\circ\text{C}$ при давлении $1,25 \pm 0,15$ кбар. Вкрапленно-прожилковая золото-сурьмяная (бертьерит-антимонитовая) минерализация образовалась при участии метанового флюида при температурах $290\text{--}240^\circ\text{C}$ и давлении $0,8 \pm 0,1$ кбар.

Значительное снижение давления (от 2,4 до 1,2–0,8 кбар) может быть связано с постколлизийным подъёмом территории, денудацией и уменьшением глубин развития минералообразующих процессов с ~10 км до 5–3 км от палеоповерхности.

Геохронологические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют о формировании слабозолотоносных пирротин-кварцевых прожилок в период коллизийного метаморфизма 860–780 млн лет назад за счёт перераспределения вещества вмещающих пород, содержащих гидротермально-осадочные сульфиды. Золото-арсено-

пиритовая и бертьерит-антимонитовая минерализация образовалась в рифтогенной обстановке синхронно с дайками субщелочных-щелочных основных и ультраосновных пород в период ~690–660 млн лет. На вероятную связь золото-сульфидного оруденения с глубинным магматизмом указывает изотопный состав осмия и серы в арсенопирите и антимоните.

Полученные данные согласуются с представлениями о ведущей роли газового флюида как транспортирующего агента в рудообразующих системах, обеспечившего эффективную миграцию огромной массы золота и сопутствующих элементов на значительные расстояния в условиях глубинного гидродинамического режима.

Термобарогеохимические признаки золотоносных флюидов, сформировавших уникальный рудный объект, могут быть использованы в качестве критериев при прогнозировании, поисках и оценке золотого оруденения на Енисейском кряже.

Авторы благодарят доктора геолого-минералогических наук, профессора П. Ю. Плечова и старшего научного сотрудника, кандидата геолого-минералогических наук В. Д. Щербакова за помощь в проведении КР-спектроскопии флюидных включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский Е. М., Кряжев С. Г. Определение состава и плотности флюида в системе $\text{CO}_2\text{--CH}_4\text{--N}_2$ методами криометрии и КР-спектроскопии // XIX Всероссийская конференция по термобарогеохимии: тезисы докладов. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2022. – С. 13–14.
2. Верниковский В. А., Метелкин Д. В., Верниковская А. Е. и др. Неопротерозойская тектоническая структура Енисейского кряжа и формирование западной окраины Сибирского кратона на основе новых геологических, палеомагнитных и геохронологических данных // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 63–90.
3. Гибшер Н. А., Томиленко А. А., Сазонов А. М. и др. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский кряж): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов, $^3\text{He}/^4\text{He}$ флюидов, Ag-Ag возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 9. – С. 1310–1329.
4. Кряжев С. Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»: автореф. дисс. на соискание учёной ст. степ. докт. геол.-мин. наук // Сергей Гаврилович Кряжев. – М. : ЦНИГРИ, 2017. – 52 с.
5. Кряжев С. Г., Гриненко В. А. Изотопный состав и источники серы золото-сульфидных месторождений Енисейского кряжа // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А. П. Виноградова: тезисы докладов. – М. : ГЕОХИ РАН, 2007. – С. 141–142.
6. Кряжев С. Г., Прасолов Э. М., Розинев М. И., Сергеев С. А. Изотопный состав благородных газов флюидных включений в кварце месторождений золота терригенных комплексов // XX симпозиум по геохимии изотопов: тезисы докладов. – М. : ГЕОХИ РАН, 2013. – С. 200–203.
7. Ли Л. В. Олимпиадинское месторождение вкрапленных золото-сульфидных руд. – Красноярск : КНИИГиМС, 2003. – 120 с.
8. Лиханов И. И., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Коллизийные метаморфические комплексы Енисейского кряжа: особенности эволюции, возрастные рубежи и скорость эксгумации // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 10. – С. 1593–1611.

9. Неволько П. А., Борисенко А. С., Травин А. В. Возраст Советского золоторудного месторождения (Енисейский кряж) // Металлогения древних и современных океанов. – 2008. – № 1. – С. 225–228.
10. Новожилов Ю. И., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М. : ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
11. Ножкин А. Д., Борисенко А. С., Неволько П. А. Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 1. – С. 158–181.
12. Павлов С. Х., Чудненко К. В. Исследование происхождения метановых и азотных термальных вод методом компьютерного моделирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 133–146.
13. Петров В. Г. Условия золотоносности северной части Енисейского кряжа. Новосибирск : Наука, 1974. – 138 с.
14. Прокофьев В. Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов: (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 192 с.
15. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. В 2 Т. Т. 1. – М. : Мир, 1987. – 560 с.
16. Свердлова В. Г., Шведенков Г. Ю., Томиленко А. А. и др. Определение объемов фазового перехода газ-жидкость в системе $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ в связи с задачами термобарогеохимии // Геохимия. – 1999. – № 5. – С. 494–505.
17. Bakker R. J. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties // Chemical Geology. – 2003. – V. 194. – P. 3–23.
18. Kerkhof A. M. The system $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ in fluid inclusions: theoretical modelling and geological applications. PhD. – Amsterdam : Vrije Universiteit, 1988. – 206 p.
19. Naumov E. A., Borisenko A. S., Nevvolko P. A. et al. Gold-sulfide (Au-As) deposits of the Yenisei Ridge (Russia): age, sources of metals and nature of fluids/Proceedings of 13th Biennial SGA Meeting, 24–27 August (Anne-Sylvie André-Mayer, Michel Cathelineau, Philippe Muchez, Eric Pirard and Sven Sindern, eds.) – V. 1. – 2015. – P. 165–168.
20. Sazonov A. M., Lobanov K. V., Zvyagina E. A. et al. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia // SEG Special Publications. – 2020. – № 23. – P. 203–226.
21. Silyanov S. A., Sazonov A. M., Naumov E. A. et al. Mineral Paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada gold deposit (Yenisei Ridge, Russia) // Ore Geology Reviews. – 2022. – V. 143. – P. 104750

REFERENCES

1. Berkovskiy Ye. M., Kryazhev S. G. Opredeleniye so-stava i plotnosti flyuida v sisteme $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ metodami kriometrii i KR-spektroskopii [Determination of the composition and density of the fluid in the $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ system by cryometry and Raman spectroscopy]. XIX Vserossiyskaya konferentsiya po termobarogeokhimii: tezisy dokladov, Novosibirsk, IPTS NGU, 2022, pp. 13–14. (In Russ.)
2. Vernikovskiy V. A., Metelkin D. V., Vernikovskaya A. Ye. et al. Neoproterozoyskaya tektonicheskaya struktura Yeniseyskogo kryazha i formirovaniye zapadnoy ok-rainy Sibirskogo kratona na osnove novykh geologi-cheskikh, paleomagnetnykh i geokhronologicheskikh dannyykh [Neoproterozoic tectonic structure of the Yenisei Ridge and the formation of the western margin of the Siberian Craton based on new geological, paleomagnetic and geochronological data]. Geologiya i geofizika, 2016, V. 57, No. 1, pp. 63–90. (In Russ.)
3. Gibsher N. A., Tomilenko A. A., Sazonov A. M. et al. Olimpiadinskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye (Yeni-seiskii kryazh): temperatura, davleniye, sostav rud-obrazuyushchikh flyuidov, $\delta^{34}\text{S}$ sul'fidov, $^3\text{He}/^4\text{He}$ flyuidov, Ar-Ar vozrast i prodolzhitel'nost' formirovaniya [Olimpiada gold deposit (Yenisei Ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, $\delta^{34}\text{S}$ sulfides, $^3\text{He}/^4\text{He}$ fluids, Ar-Ar age and duration formation]. Geologiya i geofizika, 2019, V. 60, No. 9, pp. 1310–1329. (In Russ.)
4. Kryazhev S. G. Geneticheskiye modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh [Genetic models and criteria for forecasting gold deposits in carbonaceous-terrigeneous complexes]. Moscow, TSNIGRI publ., 2017, 52 p. (In Russ.)
5. Kryazhev S. G., Grinenko V. A. Izotopnyy sostav i istochniki sery zoloto-sul'fidnykh mestorozhdeniy Yeniseyskogo kryazha [Isotopic composition and sources of sulfur in gold-sulfide deposits of the Yenisei Ridge]. XVIII Simpozium po geokhimii izotopov imeni akademika A. P. Vinogradova: tezisy dokladov, Moscow, GEOKHI RAN publ., 2007, pp. 141–142. (In Russ.)
6. Kryazhev S. G., Prasolov E. M., Rozinov M. I., Sergeyev S. A. Izotopnyy sostav blagorodnykh gazov flyuidnykh vkluycheniy v kvartse mestorozhdeniy zolota terrigenykh kompleksov [Isotope composition of noble gases of fluid inclusions in quartz of gold

- deposits of terrigenous complexes]. XX simpozium po geokhimii izotopov: tezisy dokladov, Moscow, GEOKHI RAN publ., 2013, pp. 200–203. (In Russ.)
7. *Li L. V.* Olimpiadinskoye mestorozhdeniye vkraplennykh zoloto-sul'fidnykh rud [Olympiada deposit of disseminated gold-sulfide ores]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS publ., 2003, 120 p. (In Russ.)
 8. *Likhanov I. I., Reverdatto V. V., Kozlov P. S.* Kollizionnyye metamorficheskiye komplekсы Yeniseyskogo kryazha: osobennosti evolyutsii, vozrastnyye rubezhi i skorost' eksyumatsii [Collisional metamorphic complexes of the Yenisei Ridge: features of evolution, age limits and exhumation rate]. *Geologiya i geofizika*, 2011, V. 52, No. 10, pp. 1593–1611. (In Russ.)
 9. *Nevol'ko P. A., Borisenko A. S., Travin A. V.* Vozrast Sovetskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Yeniseyskiy kryazh) [Age of the Soviet gold deposit (Yenisei Ridge)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*, 2008, No. 1, pp. 225–228. (In Russ.)
 10. *Novozhilov Yu. I., Gavrilov A. M.* Zoloto-sul'fidnyye mestorozhdeniya v uglerodisto-terrigennykh tolshchakh [Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenous strata]. Moscow, TSNIGRI publ., 1999, 175 p. (In Russ.)
 11. *Nozhkin A. D., Borisenko A. S., Nevol'ko P. A.* Etapy pozdneproterozoyskogo magmatizma i vozrastnyye rubezhi zolotogo orudneniya Yeniseyskogo kryazha [Stages of Late Proterozoic magmatism and age limits of gold mineralization in the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 2011, V. 52, No. 1, pp. 158–181. (In Russ.)
 12. *Pavlov S. Kh., Chudnenko K. V.* Issledovaniye proiskhozhdeniya metanovykh i azotnykh termal'nykh vod metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Study of the origin of methane and nitrogen thermal waters by computer simulation]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, 2013, V. 6, No. 1, pp. 133–146. (In Russ.)
 13. *Petrov V. G.* Usloviya zolotonosnosti severnoy chasti Yeniseyskogo kryazha [Gold-bearing conditions in the northern part of the Yenisei Ridge]. Novosibirsk, Nauka publ., 1974, 138 p. (In Russ.)
 14. *Prokof'yev V. Yu.* Geokhimicheskiye osobennosti rudoobrazuyushchikh flyuidov gidrotermal'nykh mestorozhdenii zolota razlichnykh geneticheskikh tipov: (po dannym issledovaniya flyuidnykh vklyuchenii) [Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types: (according to the study of fluid inclusions)], Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN publ., 2000, 192 p. (In Russ.)
 15. *Redder E.* Flyuidnyye vklyucheniya v mineralakh [Fluid inclusions in minerals]. V. 1, Moscow, Mir publ., 1987, 560 p. (In Russ.)
 16. *Sverdlova V. G., Shvedenkov G. Yu., Tomilenko A. A.* et al. Opredeleniye ob'yemov fazovogo perekhoda gaz-zhidkost' v sisteme CO₂-CH₄-N₂ v svyazi s zadachami termobarogeokhimii [Determination of the volumes of the gas-liquid phase transition in the CO₂-CH₄-N₂ system in connection with problems of termobarogeochemistry]. *Geokhimiya*, 1999, No. 5, pp. 494–505. (In Russ.)
 17. *Bakker R. J.* Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 2003, V. 194, pp. 3–23.
 18. *Kerkhof A. M.* The system CO₂-CH₄-N₂ in fluid inclusions: theoretical modelling and geological applications. PhD, Amsterdam, Vrije Universiteit, 1988, 206 p.
 19. *Naumov E. A., Borisenko A. S., Nevolko P. A.* et al. Gold-sulfide (Au-As) deposits of the Yenisei Ridge (Russia): age, sources of metals and nature of fluids. *Proceedings of 13th Biennial SGA Meeting*, 24–27 August (Anne-Sylvie André-Mayer, Michel Cathelineau, Philippe Muchez, Eric Pirard and Sven Sindern, eds.), V. 1, 2015, pp. 165–168.
 20. *Sazonov A. M., Lobanov K. V., Zvyagina E. A.* et al. Olympiada Gold Deposit, Yenisei Ridge, Russia. SEG Special Publications, 2020, No. 23, pp. 203–226.
 21. *Silyanov S. A., Sazonov A. M., Naumov E. A.* et al. Mineral Paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, V. 143, pp. 104750