

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ И РУДАХ КОСТОМУКШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ (КАРЕЛИЯ)

С. В. Петров, Т. А. Головина

Санкт-Петербургский государственный университет

В статье приводятся новые сведения о геохимии и минералогии благородных металлов (золото, металлы платиновой группы) во вмещающих породах и рудах Костомукшского месторождения железистых кварцитов (Карелия). Представлены результаты изучения околорудных образований одного из участков восточного фланга Южного карьера, где ранее нами были установлены повышенные содержания золота и впервые обнаружены минералы ЭПГ. Наблюдения минеральных сростаний благородных металлов позволили выделить две основные благороднометалльные ассоциации. Наиболее ранняя связана с метаморфизмом магматических горных пород основного состава, обогащена платиновыми металлами и формируется в условиях высоких температур от 500—550 до 380—400 °С. Более поздняя ассоциация имеет золотую специфику, приурочена к золото-теллуридно-висмутовому парагенезису и начинает формироваться при температурах ниже 380 до 260 °С, а заканчивается — при температурах 110—120 °С.

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ ДОБЫВАЕМОГО НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РОССИИ

Особенностью российской минерально-сырьевой базы предприятий черной металлургии является наличие ряда негативных факторов, важнейшие из которых:

- несбалансированное размещение месторождений железных руд и ее потребителей руды, которое резко увеличивает долю транспортных расходов в себестоимости руды;
- низкое качество руд, среднее содержание железа в крупнейших российских месторождениях железа 32—35 % (тогда как в мире больше 40 %), доля высокосортных руд мала.

Одним из путей повышения рентабельности предприятий является повышение ценности добываемого на месторождениях сырья за счет комплексного использования, связанное с получением попутных продуктов. Прежде всего, это производство из скальных пород вскрыши строительного щебня различного назначения, из рыхлых — кирпичных и огнеупорных глин, мела и песчано-гравийных смесей. Кроме того, на отдельных предприятиях из руд попутно добываются металлы и промышленные минералы: на Ковдорском — апатит и бадделейт; на Качканарском — ванадий; на Волковском — медь, ванадий, апатит;

на Высокогорском — медь. На последних двух совместно с медью из руд извлекаются редкие и благородные металлы (селен, теллур, золото и серебро, а на Волковском, еще и платиноиды). Месторождения железистых кварцитов восточной части Балтийского щита — Костомукшское в Карелии и Оленегорской группы на Кольском полуострове — являются монометалльными. Из попутной продукции здесь производится только строительный щебень, в котором утилизируется 20—25 % отходов добычи и обогащения руд.

ЗОЛОТОНОСНОСТЬ АРХЕЙСКОЙ ПОЛОСЧАТОЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ФОРМАЦИИ

В настоящее время достоверно установлено присутствие золота и металлов платиновой группы в железистых кварцитах [1—10].

Содержания золота в железистых кварцитах крайне низкие, хотя и на порядок превышают кларковые. Распределение в рудах также чрезвычайно неравномерное — среди основной массы кварцитов, содержащих фоновые концентрации золота (0,005—0,01 г/т), встречаются обогащенные пласты, минерализованные зоны (десятые г/т до первых г/т) и рудные столбы, содержащие до 3—20 г/т металла. Высокие концентрации металлов платиновой группы на месторождениях железистых кварцитов достоверно не установлены. В отдельных пробах сульфидизированных кварцитов, метасоматитах по мафическим породам обнаруживаются концентрации платины и палладия (0,00n 0, n г/т).

Анализ распределения благородных металлов в пределах месторождений железистых кварцитов позволяет установить две тенденции их концентрации:

1. Повышенные содержания золота и серебра приурочены к сульфидизированным разностям руд. Магнетит-гематитовые и магнетитовые кварциты в несколько раз беднее этими элементами (рис. 1).

2. Другая тенденция является следствием первой, содержания благородных металлов увеличиваются в соответствии с зональностью оруденения от центральных частей рудных тел (сложенных магнетит-гематитовыми рудами, постепенно сменяющимися магнетитовыми разновидностями) к периферическим (сульфидизированным) зонам. В

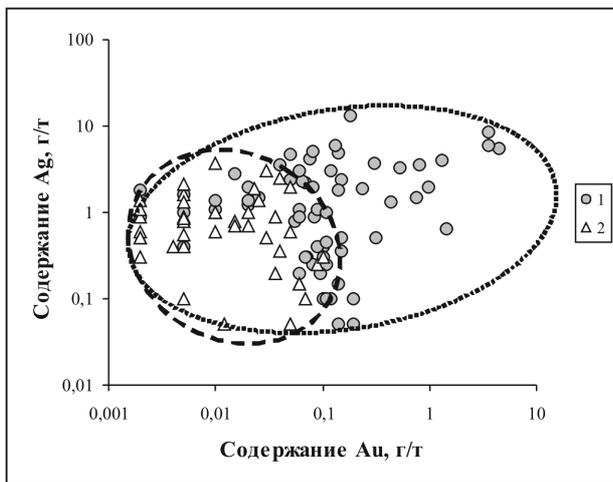


Рис. 1. Зависимость между содержаниями золота и серебра в рудах месторождений железистых кварцитов (Костомукшского, Михайловского, Лебединского и Оленегорской группы месторождений). 1 — сульфидизированные руды (средние содержания: Au — 0,347 г/т; Ag — 2 г/т); 2 — магнетитовые и магнетит-гематитовые руды (средние содержания: Au — 0,018 г/т; Ag — 0,64 г/т)

ближайшем контакте руд с вмещающими породами содержание благородных металлов продолжает расти, достигая максимума на расстоянии 50-120 м от контакта (табл. 1). Далее, во вмещающих породах содержания постепенно падают до фоновых — 0,00n г/т.

Таким образом, при исследовании полосчатой железорудной формации следует различать золотоносность железных руд и вмещающих горных пород. Поскольку в первом случае благородные металлы могут рассматриваться как объект попутной добычи при обогащении железных руд и как

Таблица 1

Средние содержания золота и серебра в железистых кварцитах и вмещающих породах (226 проб)

Элемент	Магнетитовые и магнетит-гематитовые кварциты (n = 83)	Сульфидизированные железистые кварциты (n = 65)	Вмещающие породы (n = 78)
Золото	0,018	0,347	0,463
Серебро	0,64	2	2,38

Примечание: В расчетах использованы данные о содержании благородных металлов в железистых кварцитах Костомукшского, Михайловского, Лебединского и Оленегорской группы месторождений.

самостоятельное полезное ископаемое, а во втором — только как объект поиска самостоятельных месторождений благородных металлов. В обоих случаях предполагаются различные параметры кондиций оруденения.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КОСТОМУКШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение представляет собой характерную сложноскладчатую структуру, главным элементом которой является узкая изогнутая синклиналичная складка, северная часть ее прослеживается в меридиональном направлении, а южная круто изгибается к востоку, меняя простирание на широтное.

Рудная толща Костомукшского месторождения сложена разнообразными сланцами и кварцитами костомукшской свиты гимольской серии лопия: кварц-биотитовыми (иногда с гранатом и ставролитом) и углеродосодержащими сланцами; биотит-магнетитовыми, грюнерит-магнетитовыми, магнетит-роговообманково-грюнеритовыми, биотит-грюнеритовыми, рибекит-магнетитовыми, актинолит-магнетитовыми кварцитами и их разновидностями [11]. Рудоносная толща залегает на амфиболовых сланцах, амфиболитах, углеродосодержащих сланцах рувинварской свиты контоксской серии лопия, а перекрывается кварц-биоитовыми и биотит-кварцевыми сланцами с гранатом, ставролитом и андалузитом сурлампинской свиты гимольской серии лопия. Характерной особенностью рудных тел является крайне сложное, не выдержанное по мощности строение, частое переслаивание с безрудными прослоями вмещающих пород, включающих линзы и прослои

сплошных пирит-пирротиновых колчеданов, обилие наложенной прожилковой кварц-сульфидной минерализации. С учетом крутого залегания это обстоятельство обуславливает высокое разубоживание руды вмещающими породами, которое на некоторых участках достигает 15—18 %.

В данной статье представлены результаты изучения околорудных образований одного из участков восточного фланга Южного карьера, в зоне влияния двух крупных субмеридиональных разломов, где ранее нами были установлены повышенные содержания золота и палладия (до 9,1 и 0,3 г/т, соответственно) [12]. По разрезу вкрест простирающихся пород от лежачего бока рудного тела до контакта с плагиопорфирами (геллефлинтами), наблюдается переслаивание контрастных по минеральному составу пород: магнетитсодержащих биотитовых кварцитов, кварц-биотитовых и биотит-кварцевых сланцев, роговообманково-, двуамфиболовых кварцитов, апогипербазитовых тальк-хлорит-тремолитовых сланцев, дайковых тел рассланцованных лампроитов и амфиболитов (мощностью до 0,5—0,8 м). Для представленных пород характерна полосчатая, сланцеватая текстура, структура гранобластовая, лепидо-гранобластовая, грано-нематобластовая, редко порфиробластовая (порфиробласты — амфиболы). Для амфибол-биотит-кварцевых разностей характерно присутствие аномально анизотропного альмандина (до 30 %), карбонатов, плагиоклаза, мусковита, серицита, хлорита, апатита, циркона. Амфиболы в основном представлены роговой обманкой, в шлифах обладающей сине-зеленой окраской, реже куммингтонитом, грюнеритом и актинолитом.

В породах изученного разреза активно проявлены процессы гидротермальных изменений, которые выражаются в хлоритизации, серицитизации, карбонатизации, окварцеванию и сульфидизации. Сульфидная минерализация фиксируется практически во всех типах пород, причем выделяется характерный ранний эпигенетический пирит-пирротиновый парагенезис, который сменяется наложенными, более поздними халькопирит-пирротиновым, пиритовым и пирит-арсенопиритовым.

БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОРОДАХ КОСТОМУКШСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Золоторудная минерализация Костомукшского месторождения, как и других месторождений же-

лезистых кварцитов, разнообразна и представлена различными генетическими типами и широкими вариациями содержаний. Различный генезис обуславливает присутствие благороднометалльной минерализации как в залежах самих железистых кварцитов, так и во вмещающих породах.

В пределах Костомукшского месторождения наиболее разнообразные в минералогическом отношении и наиболее значительные по содержанию золота проявления локализуются в местах совмещения контрастных по составу горных пород (кварцитов, сланцев с углеродистым веществом, прослоев и даек основного и ультраосновного состава) в зонах крупных субмеридиональных тектонических структур. Подобные геологические ситуации чаще всего наблюдаются во вмещающих породах, непосредственно прилегающих к рудным телам железистых кварцитов. В лежачем боку железорудных тел зафиксированы самые высокие содержания золота (до 30 г/т), что значительно превышает концентрации металла в железистых кварцитах Костомукшского месторождения и продуктах их переработки. Данных о присутствии металлов платиновой группы в рудах и горных породах месторождения до сих пор получено не было.

Вследствие низких концентраций благородных металлов в железистых кварцитах Костомукшского месторождения надежное прямое определение с помощью пробирного атомно-абсорбционного анализа не возможно (пределы обнаружения — 0,02 г/т, ЗАО «РАЦ Механобр Инжиниринг Аналит», Санкт-Петербург). Поэтому для анализа использовано предварительное гравитационное концентрирование укрупненных сборных проб руды (массой 10—25 кг), характеризующих отдельные рудные тела месторождений и текущую руду (табл. 2). Пробы руды подвергались дроблению и измельчению до конечной крупности менее 0,5 мм, после чего подвергались концентрированию на центробежном концентраторе Knelson 3,5” с доводкой концентрата на столе СКЛ-2 и в магнитном поле (хвосты доводки и магнитные фракции концентрата составляют промпродукт, табл. 3).

Содержание благородных металлов в минералого-технологических пробах (массой 4-6 кг) сульфидизированных кварцитов и метасоматически измененных вмещающих породах значительно выше. При пробирном анализе тяжелых фракций руды в этих же пробах фиксируются металлы платиновой группы (табл. 3).

Таблица 2
Средние содержания золота в некоторых рудных телах железистых кварцитов Костомукшского месторождения

Рудные тела	Выход гравитационного концентрата, %	Содержание Au, г/т	
		в концентрате	расчетное в исходной руде
№ 30	9,2	0,03	0,003
№ 31	12,2	0,06	0,007
№ 15	9,6	0,05	0,005
№ 14	8,1	0,02	0,002
№ 14.32	5,3	0,38	0,02
№ 19	8,2	0,06	0,005

Сульфидная фракция, выделенная из наиболее обогащенных благородными металлами сульфидизированных дайковых амфиболитов, содержит около 7 г/т суммы платиновых металлов при соотношении Pd/Pt = 0,5 и 18 г/т золота (табл. 4). Распределение благородных металлов, меди и никеля в силикатной составляющей амфиболита, нормированное относительно содержания этих металлов в примитивной мантии [13], близко к такому в коматиитах Костомукшской зеленокаменной структуры [14] (рис. 2). Распределение металлов сульфидной составляющей характерно для руд, прошедших различные этапы дифференциации или имеющих метасоматический генезис, они заметно отличаются от распределения элементов в сульфидной фазе коматиитовых никелевых руд [15].

Таблица 3

Результаты гравитационного обогащения проб руд и вмещающих пород Костомукшского месторождения железистых кварцитов

Горные породы и руды	Технологические продукты	Выход, мас. %	Содержание, г/т		
			Au	Pd	Pt
Сульфидизированные амфиболиты (проба 3.10)	Концентрат доводки	1,94	12,5	0,32	1,2
	Промпродукт	1	2,7	<0,02	0,1
	Магнитная фракция гравитационного концентрата	0,45	0,05	<0,02	<0,02
	Итого: гравитационный концентрат	3,39	7,95	<0,02	<0,02
	Хвосты гравитации	96,61	0,01	<0,02	<0,02
	Исходная проба	100	0,279	>0,007	>0,024
Магнетитсодержащие кварц-биотит-амфиболовые сланцы (проба 03.20)	Концентрат доводки	1,03	32	0,36	0,14
	Промпродукт	1,33	3,1	0,05	<0,02
	Магнитная фракция гравитационного концентрата	1,82	0,05	<0,02	<0,02
	Итого: гравитационный концентрат	4,18	8,88	<0,02	<0,02
	Хвосты гравитации	95,82	0,01	<0,02	<0,02
	Исходная проба	100	0,381	>0,004	>0,002
Окварцеванные и сульфидизированные магнетитсодержащие кварциты (проба 03.24)	Концентрат доводки	4,34	1,2	0,1	0,1
	Промпродукт	1,46	0,04	<0,02	<0,02
	Итого: гравитационный концентрат	5,81	5,27	<0,02	<0,02
	Хвосты гравитации	94,19	0,01	<0,02	<0,02
	Исходная проба	100	0,315	>0,002	>0,002
Магнетитовые кварциты, (проба 03.21, 30 рудное тело)	Концентрат доводки	0,068	0,41	<0,02	<0,02
	Промпродукт	6,201	0,05	<0,02	<0,02
	Итого: гравитационный концентрат	6,269	0,05	<0,02	<0,02
	Хвосты гравитации	93,731	0,01	<0,02	<0,02
	Исходная проба	100	0,013	>0,001	>0,001
Сульфидизированные магнетитовые кварциты (проба 03.21/5, 30 рудное тело)	Концентрат доводки	9,16	3,8	0,12	0,1
	Промпродукт	5,1	0,05	<0,02	<0,02
	Итого: гравитационный концентрат	14,25	2,46	<0,02	<0,02
	Хвосты гравитации	85,75	0,01	<0,02	<0,02
	Исходная проба	100	0,359	>0,001	>0,001

Примечание: Содержание в исходной пробе рассчитано исходя из концентрации металлов в концентрате.

Таблица 4

Содержание (мг/т) элементов платиновой группы, золота, никеля и меди в амфиболитах и коматитах Костомукшского месторождения железистых кварцитов

Пробы	Ni, г/т	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Cu, г/т
Амфиболит	4250	5,4	5,4	5,6	5,8	69	39	166	180
- в т.ч. сульфидная составляющая	32000	50	50	70	100	4500	2200	18000	8800
- в т.ч. силикатная составляющая	4000	5	5	5	5	30	20	8	100
Коматиты района Костомукши	1266	1,5	1,95	3,9	1,4	8,7	12	1,7	65

Примечание: Содержание в исходной пробе амфиболита рассчитано с учетом выхода сульфидной (0,9 %) и силикатной (99,1 %) составляющих. Содержание элементов в коматитах из работы I.S. Puchtel, M. Humayun (2000)

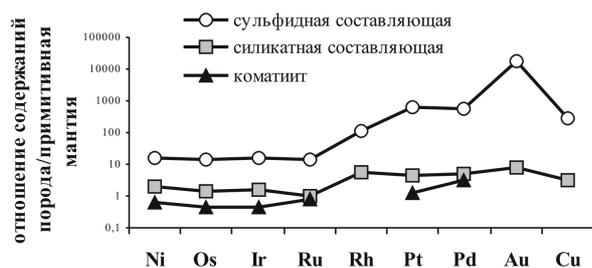


Рис. 2. Распределения ЭПГ, Ni и Cu в силикатной и сульфидной составляющих амфиболита нормализованные относительно содержания в примитивной мантии [13]. Распределение для коматитов Костомукшского зеленокаменного пояса из работы I. S. Puchtel и M. Humayun [14]

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СОПУТСТВУЮЩИЕ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОМУ ОРУДЕНЕНИЮ В ПОРОДАХ КОСТОМУКШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Данные о содержании 26 элементов в 109 пробах руд и вмещающих пород Костомукшского месторождения, полученные в результате проведенного эмиссионного спектрального анализа, обработаны с применением методов многомерной статистики. Рассчитаны нагрузки химических элементов по пяти факторам, описывающим 62 % общей дисперсии (F1 — 25 %, F2 — 14 %, F3 — 10 %, F4 — 7 %, F5 — 6 % от общей дисперсии, критическое значение коэффициента корреляции 0,19):

$$F1 = \frac{Cr\ 0,89\ Mg\ 0,87\ V\ 0,84\ Ti\ 0,8\ Sc\ 0,78\ Ni\ 0,77\ Co\ 0,68\ Ca\ 0,5\ K\ 0,47\ Mn\ 0,44\ As\ 0,39\ Zr\ 0,38\ Ba\ 0,29}{Cu\ 0,2}$$

$$F2 = \frac{Na\ 0,87\ Ba\ 0,75\ Pb\ 0,66\ K\ 0,53\ Mo\ 0,46\ Sr\ 0,43\ Zr\ 0,35\ Ti\ 0,28\ V\ 0,21}{Mn\ 0,34\ MgO\ 0,22}$$

$$F3 = \frac{Zn\ 0,74\ Cu\ 0,73\ Mn\ 0,55\ Sn\ 0,55\ Ag\ 0,52\ Co\ 0,50\ Ni\ 0,32\ Pb}{0,30}{Sr\ 0,32}$$

$$F4 = \frac{P\ 0,81\ Ge\ 0,68\ Y\ 0,46\ Zn\ 0,29\ K\ 0,28\ Zr\ 0,25\ Pb\ 0,21\ Ca\ 0,20}{Cu\ 0,25\ Ni\ 0,19}$$

$$F5 = \frac{Au\ 0,82\ Y\ 0,60\ As\ 0,56\ Ag\ 0,35\ Zr\ 0,21\ Sc\ 0,19}{Sr\ 0,21\ Sn\ 0,2}$$

Первый фактор отражает общую изменчивость вещественного состава петрографических разновидностей пород слагающих рудоносную толщу от кварцитов, (имеющих наименьшие значения данного фактора) до апогипербазитовых метасоматитов, обогащенных Cr, Mg, V, Ti, Sc, Ni, Co, Ca, K, Mn. Стоит отметить, что в ассоциацию элементов, характерных для основных пород, со значимой положительной нагрузкой входит и мышьяк, который ассоциирует с золотом и серебром по другим факторам.

Показательным является также второй фактор, который отражает перераспределения химических элементов в результате регионального метасоматического процесса, выражающегося в развитии щелочных ассоциаций минералов (эгирина, рибекита, щелочного плагиоклаза) и связанного с ним последующего кислотного метасоматоза, характеризующегося образованием слюд. Характерно, что Na, Ba, Pb, K, Mo, Sr, Zr, Ti, V, имеющим положительную нагрузку по этому фактору, противостоит ассоциация элементов, к которой с меньшими нагрузками тяготеет As-Au ассоциация.

Третий фактор определяется положительными нагрузками полиметаллической ассоциации Zn, Cu, Mn, Sn, Ag, Co, Ni, Pb которая отражает общую металлогеническую специализацию процесса контактового метаморфизма, вызванного внедрением протерозойских гранитоидов.

Четвертый фактор характеризуется сильными положительными нагрузками P, Ge, Y, Zn, K, Zr, Pb, Ca и также как и второй фактор отражает метасоматические процессы связанные с формированием слюдисто-амфиболовых ассоциаций, которые развиваются преимущественно в породах повышенной основности (базиты, ультрабазиты и метасоматиты по ним, лампроиты).

Пятый фактор фиксирует собственно золоторудную ассоциацию Au-Y-As-Ag. Прямая корреляция Au-As позволяет нам отнести проявления благородных металлов в пределах Костомукшского месторождения железистых кварцитов к золото-мышьяковой формации. Стоит отметить, что поведение Ag не коррелирует с Au-As ассоциацией, а по первому и второму факторам даже демонстрирует некоторый антагонизм. Основным концентратом иттрия являются метасоматические кальциевые амфиболы, которые входят в состав вмещающих пород золоторудной ассоциации.

Отдельно был обработан массив данных из 56 проб, в которых определено содержание платины и палладия. При этом структура факторных нагру-

зок и их интерпретация принципиально не меняется, а платина и палладий входят в формулу пятого фактора вместе с золотом, мышьяком и кобальтом ($F_5 = \text{Pd } 0,83 \text{ As } 0,83 \text{ Pt } 0,8 \text{ Au } 0,56 \text{ Co } 0,27$).

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ

Минералы благородных металлов установлены в гравитационных концентратах минералогического проб (табл. 3), а также в шлифах.

Минералы платиновых металлов установлены на Костомукшском месторождении впервые, они выделены из гравитационных концентратов сульфидизированных амфиболитов (проба 3.10, 3.15) и магнетитсодержащих кварц-биотит-амфиболовых сланцев (проба 03.20) лежащего бока южного фланга месторождения.

В пробе амфиболитов обнаружен сперрилит (PtAs_2) в виде изометрических зерен размером до 25 мкм, его состав практически идеально соответствует стехиометрическому (рис. 2.в). Зерна меренскита (PdTe_2) размером около 40 мкм установленные в пробе амфиболитов, содержат примеси Pt (до 4,7 мас. %) и Bi (до 5,8 мас. %), рассчитанные формулы минерала ($\text{Pd}_{0,98}\text{Pt}_{0,02}$)_{1,00}($\text{Te}_{1,90}\text{Bi}_{0,10}$)_{2,00}, ($\text{Pd}_{0,92}\text{Pt}_{0,09}$)_{1,01}($\text{Te}_{1,92}\text{Bi}_{0,08}$)_{2,00} (рис. 2.а, 2.б). В ассоциации с платиновыми минералами в пробе встречены никелин, минералы ряда герсдорфит — кобальтин, арсенопирит с малыми содержаниями примесей и леллингит с повышенной концентрацией никеля (табл. 5), реже — самородное золото.

В пробе магнетитсодержащих кварц-биотит-амфиболовых сланцев также обнаружен меренскит в сростании с мончеитом (PtTe_2) (рис. 3 г). Кристалл мончеита с меренскитовой оторочкой имеет размер около 20 мкм, состав характеризуется примесью Pd (0,6 мас. %) и Bi (6 мас. %). В составе меренскита из оторочки присутствует Pt в количестве 18,6 мас. % и Bi — 12,5 мас. %. Рассчитанные формулы меренскита ($\text{Pd}_{0,62}\text{Pt}_{0,40}$)_{1,02}($\text{Te}_{1,75}\text{Bi}_{0,25}$)_{2,00} и мончеита ($\text{Pt}_{0,98}\text{Pd}_{0,03}$)_{1,01}($\text{Te}_{1,87}\text{Bi}_{0,13}$)_{2,00}. В состав благороднометалльной ассоциации входят пирит, арсенопирит, леллингит (табл. 5), минералы висмута, теллура и самородное золото.

Самородное золото во вмещающих породах и сульфидизированных оруденелых кварцитах установлено в составе поздних халькопирит-пирротинных, пиритовых и, особенно часто, в пирит-арсенопиритовых ассоциаций. В последней ассоциации самородное золото приурочено к выделениям

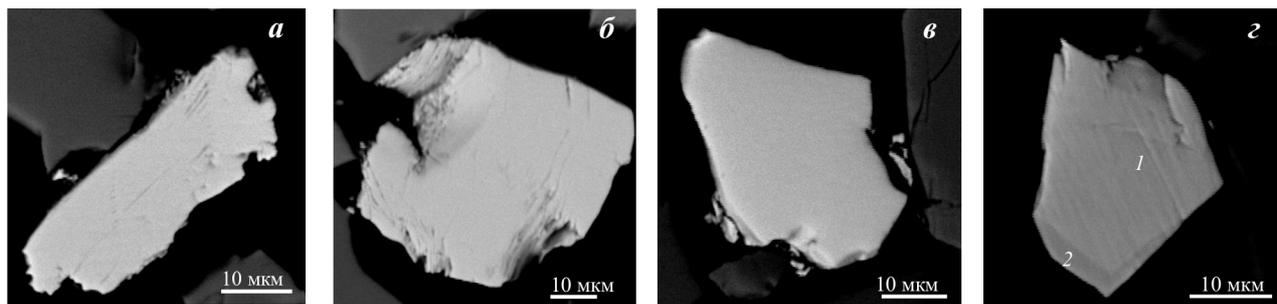


Рис. 3. Формы выделения минералов платиновых металлов из вмещающих пород Костомукшского месторождения: а, б – меренскит; в – сперрилит; г – зональный кристалл мончеита (1) с внешней меренскитовой оторочкой (2)

Таблица 5

Химический состав сульфидов, сульфоарсенидов и арсенидов благороднометалльных ассоциаций Костомукшского месторождения железистых кварцитов

№ проб	Минералы	Элементы, мас. %						Формульные коэффициенты				
		Fe	Co	Ni	As	S	Сумма	Fe	Co	Ni	As	S
03.10	Никелин	0,3	0,6	43,3	55,8		100	0,007	0,014	0,990	1,000	0,000
03.10		0,5		44	55,5		100	0,012	0,000	1,012	1,000	0,000
03.10	Герсдорфит	10,3	4,6	20,1	45,6	19,4	100	0,305	0,129	0,566	1,006	1,000
03.10		10,9	1,4	22,5	46	19,2	100	0,326	0,040	0,640	1,025	1,000
03.10		11,8	1,1	22,2	45,6	19,3	100	0,351	0,031	0,628	1,011	1,000
03.10		8,4	9	18,1	45,2	19,3	100	0,250	0,254	0,512	1,002	1,000
03.15		8,6	5,6	21,1	45,4	19,3	100	0,256	0,158	0,597	1,007	1,000
03.15	Кобальтин	4,2	19,3	12,4	44,9	19,2	100	0,126	0,547	0,353	1,001	1,000
03.15		5,5	22,3	7,5	45,3	19,4	100	0,163	0,625	0,211	0,999	1,000
03.15	Леллингит	21,1	0,5	6,4	72		100	0,786	0,018	0,227	2,000	0,000
03.20		20,5	0,3	7,2	71,8	0,2	100	0,766	0,011	0,256	2,000	0,013
03.20		13,3	2	12,8	71,9		100	0,496	0,071	0,454	2,000	0,000
03.20		12,6	0,9	14,3	72,2		100	0,468	0,032	0,506	2,000	0,000
18		21,9	0,9	5,6	71,6		100	0,821	0,032	0,200	2,000	0,000
18		18,3	1,5	8,6	71,6		100	0,686	0,053	0,307	2,000	0,000
03.10	Арсенопирит	32,3	0,5	1,5	46	19,7	100	0,941	0,014	0,042	0,999	1,000
03.10		33,8		0,5	46,2	19,5	100	0,995	0,000	0,014	1,014	1,000
03.20		32,7	1,8	0,5	45,2	19,8	100	0,948	0,049	0,014	0,977	1,000
03.20		32,8	1,4	0,8	45,1	19,9	100	0,946	0,038	0,022	0,970	1,000
03.20		33,2	0,6	0,4	46,1	19,7	100	0,968	0,017	0,011	1,001	1,000
03.20		32,3	0,4	1,6	46	19,7	100	0,941	0,011	0,044	0,999	1,000
18		32,6	0,6	0,4	46,8	19,6	100	0,955	0,017	0,011	1,022	1,000
18		33,1	0,6	0,3	46,1	19,9	100	0,955	0,016	0,008	0,991	1,000
18		32,4	0,5	0,7	46,6	19,8	100	0,940	0,014	0,019	1,007	1,000
18		32,6	0,4	0,9	46,6	19,6	100	0,955	0,012	0,024	1,016	1,000
03.20	Пирит	44	0,9	1,6		53,5	100	0,944	0,018	0,033	0,000	2,000
03.20		45,8	0,2			54	100	0,974	0,004	0,000	0,000	2,000
03.20		46,1		0,2		53,7	100	0,986	0,000	0,004	0,000	2,000
03.20		41,7	1,7	3,3		53,3	100	0,898	0,035	0,068	0,000	2,000
03.20		45,2		1,2		53,6	100	0,968	0,000	0,024	0,000	2,000

Химический состав минералов золота, висмута и теллура из золоторудной ассоциации Костомукшского месторождения железистых кварцитов

№ пробы	Минерал	Содержания, мас. %						Формульные коэффициенты				
		Pb	Te	Bi	Sb	Au	Сумма	Pb	Te	Bi	Sb	Au
18	Ауростибит	8,4		7,8	49,6	34,2	100	0,182		0,168	1,832	0,781
03.20				5,2	50,6	44,2	100			0,113	1,887	1,018
03.20	Мальдонит		3,4	35,3		61,3	100		0,158	1,000		1,842
03.20				34,8		65,2	100			1,000		1,988
18		4		34,3		61,7	100	0,118		1,000		1,909
03.20	Висмут — мальдонит			80,3		19,7	100	тонкие сростания Bi+Mld				
03.20	Цумоит	5,3	38	56,7			100	0,086	1,000	0,911		
03.20		5,2	37,3	56,7	0,8		100	0,084	0,978	0,908	0,022	
03.20		7,3	37,8	54,9			100	0,119	1,000	0,887		
03.20		2,6	39,2	58,2			100	0,041	1,000	0,907		
03.20			37,5	62,5			100		1,000	1,018		
03.20	Цумоит — пильзенит		33,3	66,7			100		3,000	3,670		
03.20	Хедлиит	2,3	23,2	74,5			100	0,061	1,000	1,961		
03.20		2,5	22,2	75,3			100	0,069	1,000	2,071		
18	Висмут — хедлиит	6,8	17,3	75,9			100	0,062	0,255	0,683		
18		3,5	16,9	79,6			100	0,032	0,250	0,718		
18		13,5	15,9	70,6			100	0,123	0,236	0,640		
18			19,5	80,5			100		0,284	0,716		
03.20	Висмут	5,6		94,4			100	0,056		0,944		
03.20		2,9		95,6		1,5	100	0,029		0,955		0,016
03.20	Интерметаллиды висмут — свинец	12,1		87,9			100	0,122		0,878		

леллингита (0,011—0,053 формульных коэффициентов — ф.к. Со и 0,2—0,454 ф.к. Ni) в ядерных частях кристаллов арсенопирита (содержащего до 0,048 ф.к. Со и 0,008-0,047 ф.к. Ni) (рис. 4). Вместе с самородным золотом с пробностью в арсенопирите 613—751 ‰ и леллингите 663—740 ‰, встречены биотит, клинохлор, марганецсодержащий (до 12 мас. %) ильменит, рутил (оба минерала, по-видимому, еще содержат воду), Pb-Te-Bi сплавы промежуточного состава хедлиит-цумоит ($Pb_{0,03-0,17}Bi_{0,56-0,73}Te_{0,27}$) и самородный висмут ($Pb_{0,07}Bi_{0,93}$). Среди включений вокруг т.н. “леллингитового стержня” кроме теллуридов висмута в ассоциации с ними и самородным золотом установлены редкие минералы золота мальдонит ($Au_{1,98}Bi_{1,00}$) и ауростибит ($Au_{1,02}Sb_{1,88}$), в одном случае наблюдался сложный сросток, состоящий из трех минералов золота (рис. 5).

Средняя пробность самородного золота составляет 840 ‰ (47 анализов) при колебаниях состава 614 — 999 ‰. В качестве примеси в золоте присутствует серебро, в отдельных золотилах отмечается примесь свинца (до нескольких мас. ‰).

Исследованиями установлено, что благороднометалльная минерализация в пределах Костомукшского месторождения железистых кварцитов имеет развитие как в рудах, так и во вмещающих кварциты породах. Железистые кварциты не несут сингенетической золотой или платиновой минерализации, хотя содержания относительно кларка повышенные, кварциты не имеют отчетливой генетической связи с развитием наложенных эпигенетических благороднометалльных ассоциаций.

На регрессивной стадии метаморфизма докембрийских толщ происходит мобилизация благородных металлов из кварцитов и вмещающих пород с обра-

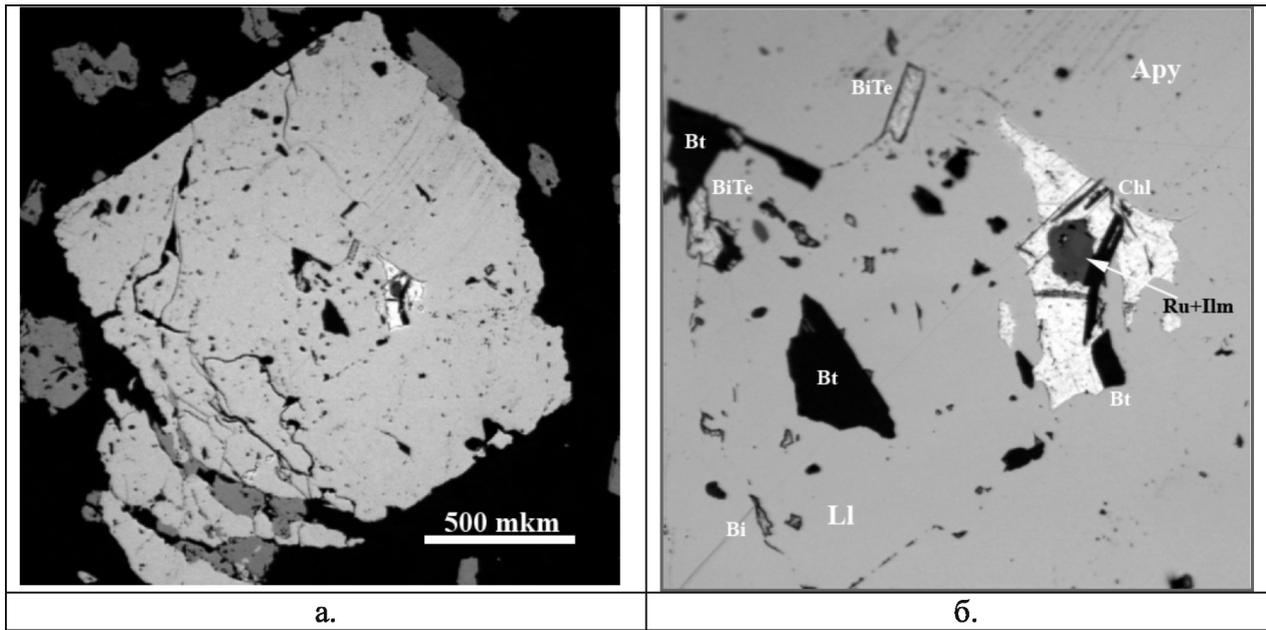


Рис. 4. а — Общий вид кристалла арсенопирита с включением леллингита в центре (т.н. “леллингитовый стержень”); б — леллингит (Ll) в арсенопирите (Apy) в ассоциации с самородным золотом (белое, размеры 220×140 мкм) и минералами теллура и висмута. Bt — биотит; Chl — клинохлор; Ru+Ilm — агрегат рутила и марганцовистого ильменита; BiTe — фазы переменного состава (тонкие сростания хедлиита и самородного висмута); Bi — самородный висмут

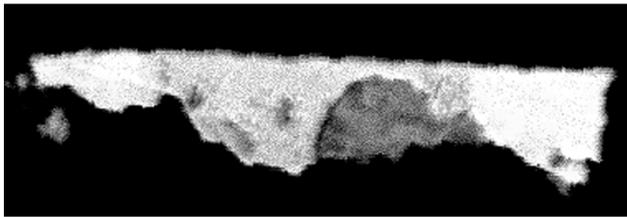


Рис. 5. Сросток самородного золота, мальдонита (Au_2Bi) и аурустибита ($AuSb_2$). Матрица — арсенопирит. Электронный микроскоп, BSE. Длина сростка 50 мкм

зованием слабопроявленных слабозолотоносных биотит-амфиболовых, биотит-гранат-амфиболовых, хлорит-амфиболовых метасоматитов; перекристаллизованных колчеданных руд с высвобожденным и переотложенным самородным золотом. Золото вы-

сокопробное, реже медистое до тетракупроаурита, содержание до 0,1—0,12 г/т в метасоматитах до 0,8 г/т — в сульфидных колчеданных рудах.

Ранняя эпигенетическая стадия в связи с внедрением гранитоидов приводит к формированию мончеит-меренскит-сперрилитовой минерализации в ассоциации с никелевыми арсенидами и сульфо-арсенидами в породах ультраосновного состава (температурный интервал от 550 до 420 °C) [16, 17]. Платиновая специализация парагенезиса с отношением Pd/Pt=0,3—0,5; содержание Pd=7—40 мг/т; Pt = 24—70 мг/т. Золото фиксируется в золото-арсенопиритовом парагенезисе с высокопробным золотом в ассоциации (пробность 820—999), содержание до 12—30 г/т (температурный интервал 350—400 °C) [18, 19].

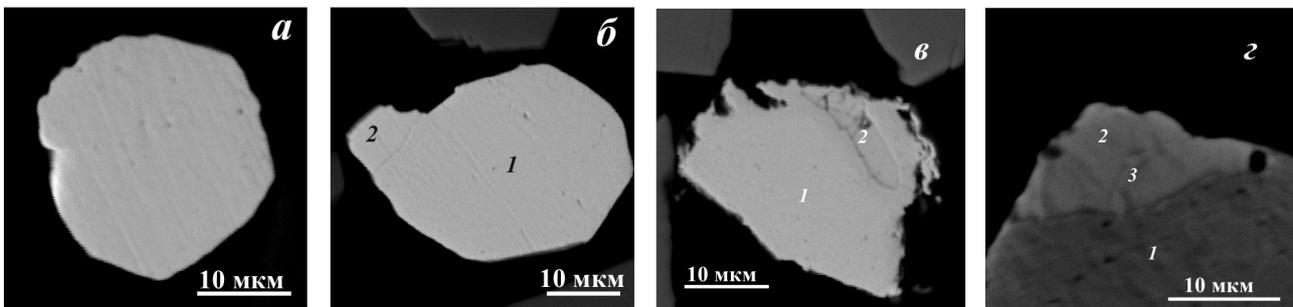


Рис. 6. Кристаллы золота и висмутовых минералов из вмещающих пород Костомукшского месторождения: а — кристалл самородного золота; б — кристалл золота(1) в сростании с теллуридом висмута (2); в — золото (1) с включениями минералов Bi-Pb состава (2); г — сложный сросток висмута (2) и мальдонита (3) в золоте (1). Изображение в BSE

Поздняя эпигенетическая стадия характеризуется развитием палладиевой меренскитовой минерализации в ассоциации с самородным золотом, теллуридами висмута и арсенопиритом (температурный интервал от 350 до 280 °С) с отношением Pd/Pt = 2—2,5 при содержании Pd = 4—290 мг/т; Pt = 2—100 мг/т. Поздний парагенезис золота характеризуется ассоциацией низкопробного золота (пробность 520—720) с леллингитом, хедлиитом, цумоитом, мальдонитом, аурустибитом. Данная ассоциация начинает формироваться при температурах ниже 380 °С (парагенезис арсенопирита и леллингита) до 260 °С (распад твердого раствора Вi-Те с образованием хедлиита и самородного висмута) и заканчивается при температурах 110—120 °С (парагенезис золота, мальдонита и аурустибита).

Разнообразие ассоциаций минералов благородных металлов во вмещающих породах Костомукшского месторождения, образующихся в широких температурных интервалах, в сочетании с большим количеством благоприятных геологических структур позволяют сделать предположение о возможности обнаружения большого по объему золоторудного объекта (хотя и с рудами низкого качества).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лопатин, А.Г. Определение содержания золота и исследование форм его нахождения в пробах конгломератов КМА. / А. Г. Лопатин //Тр. ЦНИГРИ. — 1969. — Вып. 82. — С. 119-128.
2. Рожков, И.С. О золотоносности железных руд Кривого Рога. / И. С. Рожков, Г. В. Писемский, Л. М. Ганжа //Докл. АН СССР. — 1971. — Т. 196. — С. 923—925.
3. Кузнецов, А.П. Золото в железных рудах и пути его извлечения. / А. П. Кузнецов, А. Н. Шелехов //Ин-т «Черметинформация», обзорн. инф. серия: Обогащение руд. — М., 1990. — Вып. 1. — 35 с.
4. Петров, С.В. Благородные металлы в железистых кварцитах и возможность их извлечения. /С.В. Петров, В.А. Сентемова //Обогащение руд. — 1998. — № 6. — С. 36-40.
5. Голиков, Н.Н. Золотоносность железистых кварцитов Оленегорского месторождения (Кольский полуостров, Россия) / Н. Н. Голиков, П. М. Горяинов, Г. Ю. Иванюк, Я. А. Пахомовский, В. Н. Яковенчук // Геол. рудн. мест., 1999. Т. 41. № 2. С. 162—170.
6. Кожевников, В.Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. / В. Н. Кожевников. — Петрозаводск: Кар. НЦ РАН. — 2000. — 223 с.
7. Чернышов, Н.М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. — Воронеж: Изд. ВГУ. — 2004 — 448 с.
8. Чернышов, Н.М. Особенности распределения и формы нахождения платиноидов и золота в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов, С. П. Молотков, С. В. Петров //Изв. вузов. Геология и разведка. — 2003. — № 5. — С. 24—30.
9. Кулешевич, Л.В. Эволюция эндогенных режимов и стадийность золотого рудообразования в Костомукшской структуре, Карелия / Л. В. Кулешевич //Докл. РАН. — 2004. — Т. 396. — № 6. — С. 808—812.
10. Чернышов, Н.М. Новые минеральные формы платиноидов и золота в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов, С. В. Петров //Докл. РАН. — 2006. — Т. 408. — № 2. — С. 1—4.
11. Горьковец, В.Я. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии / В. Я. Горьковец, М. Б. Раевская, О. И. Володичев, Л. С. Голованова — Л.: Наука, 1991. — 171 с.
12. Головина, Т.А. Золото во вмещающих породах Костомукшского железорудного месторождения / Т. А. Головина, А. С. Ватолин // XIV молодежная конф., посв. памяти К. О. Кратца «Геология и геоэкология Северо-Запада России»: Мат. конф. Петрозаводск. — 2003. — С. 25—26.
13. McDonough, W.F. The composition of the earth / W. F. McDonough, S.-S. Sun //Chem. Geol. — 1995. — № 120. — P. 223—253.
14. Puchtel, I.S. Platinum group elements in Kostomuksha komatiites and basalts: Implications for oceanic crust recycling and core-mantle interaction / I. S. Puchtel, M. Humayun // Geochim. et Cosmochim. Acta — 2000. — № 64. — P. 4227—4242.
15. Leshner, C.M. Komatiite-associated Ni-Cu-PGE Deposits: Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Genesis /C. M. Leshner, R. R. Keays // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. ed. by Louis J. Cabri, — 2002. — CIM, Spec. Vol. 54. — P. 579—618.
16. Klemm, D. Synthesen und analysen in den dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS₂-CoS₂-NiS₂ /D. Klemm // N. Jb. Miner. Abh. — 1965. — Bd. 103. — Hf. 3. — P. 96—120.
17. Gervilla, F. New data on (Ni, Fe, Co) diarsenides and sulfarsenides in chromite-niccolite ores from the Malaga province, Spain / F.Gervilla, J. Ronsbo //N. Jb. Miner. Mh. Jg. — 1992. — Н. 5. — P. 193—206.
18. Гамянин, Г.Н. Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России / Г. Н. Гамянин, В. И. Гончаров, Н. А. Горячев //Тихоокеан. геология — 1998. — Т. 17. — № 3. — С. 94—103.
19. Гамянин, Г.Н. Ni-Co-арсениды и сульфидарсениды золото-редкометалльных месторождений Восточной Якутии / Г. Н. Гамянин, Л. И. Лыхина // Зап. ВМО. — 2000. — № 5. — С. 43—50.