



УДК 549.2/8:553.3/4:553.491.8.04.(47+57)

МИНЕРАЛЬНЫЕ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ И ЗОЛОТА В ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТАХ ЛЕБЕДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)

Член-корреспондент РАН Н.М. Чернышов*, С.В. Петров**

*Воронежский государственный университет

**Санкт-Петербургский государственный университет

Впервые в различных типах железистых кварцитов одного из крупнейших в мире Лебединского месторождения Курской магнитной аномалии (КМА) в гравитационном концентрате минералого-технологических проб электронномикроскопическими исследованиями установлены минералы элементов платиновой группы: самородные рутений ($Ru_{0,64} Ir_{0,16} Os_{0,10} Pt_{0,06} Pd_{0,01} Rh_{0,01}$) и осмий ($Os_{0,77} Ir_{0,19} Ru_{0,03} Pt_{0,01}$); минералы ряда осмий, рутений, иридий (1. $Os_{0,34} Ru_{0,28} Ir_{0,26} Pt_{0,07} Rh_{0,02} Fe_{0,01} Ni_{0,01}$; 2. $Os_{0,41} Ir_{0,28} Ru_{0,22} Pt_{0,08} Rh_{0,01}$); рутений, платина, родий ($Ru_{0,38} Pt_{0,32} Rh_{0,13} Ir_{0,06} Os_{0,06} Fe_{0,04} Ni_{0,01}$); рутений, иридий, осмий, платина ($Ru_{0,29} Ir_{0,28} Os_{0,19} Pt_{0,17} Fe_{0,05} Rh_{0,01}$); прассоит ($(Rh_{16,45} Pt_{0,61} Ru_{0,43} S_{17,49} S_{15,00})$); сперрилит (1. $(Pt_{1,01} Fe_{0,02})_{1,03} (As_{1,91} S_{0,09})_{2,00}$; 2. $(Pt_{1,01} Fe_{0,03})_{1,04} (As_{1,95} S_{0,05})_{2,00}$; 3. $(Pt_{0,92} Rh_{0,17} Pd_{0,02} Ru_{0,62})_{1,13} As_{2,00}$), ассоциирующие с количественно преобладающим высокопробным (813-982) самородным золотом ($Au_{0,70-0,96} Ag_{0,02-0,30}$), золото-серебряным сплавом ($Au_{0,49} Ag_{0,50} Fe_{0,01}$), петцитом – ($Ag_{3,09} Au_{1,03} Te_{2,00}$); гесситом – ($Ag_{1,99} Au_{0,03} Te_{2,02} (Te_{0,96} Bi_{0,04})_{1,01}$); цумоитом – $Te_{0,51} Bi_{0,48} Au_{0,01}$; халькопиритом. Значительные концентрации ЭПГ и Au сосредоточены в сульфидах ($Pd=0,01-0,43$ мас. %, $Pt=0,01-0,44$ мас. %; $Au=0,02-0,51$ мас. %), теллуриде висмута ($Pt=1,28$ мас. %; $Au=0,27$ мас. %), арсенопирите ($Pt=0,18$ мас. %).

В пяти месторождениях (Михайловское, Лебединское, Стойленское, Стойло-Лебединское, Коробковское) КМА сосредоточено две трети разведанных запасов страны и ее прогнозных ресурсов. Эти суперкрупные и супергигантские месторождения содержат 33,3 млрд т разведанных и 65,6 млрд т предварительно оцененных запасов железных руд России [1, 2], которые перерабатываются тремя ГОКами (Михайловский, Лебединский, Стойленский), обеспечивая около 53 % добываемого в стране железорудного сырья.

Важнейшим компонентом железистых кварцитов и гигантских по объему промпродуктов (прежде всего хвостотвалов) горнорудных предприятий являются благородные металлы, выступающие в качестве одного из крупнейших нетрадиционных источников попутной золото-платинодобычи XXI столетия [3]. В выборе и создании наукоемких ресурсосберегающих технологий комплексного освоения и глубокой переработки стратегически важных металлов особое значение имеет выявление форм нахождения золота и платиноидов.

Наиболее детально изучена минералогия золота, которое в ряде железорудных месторождений мира образует промышленные золоторудные объекты [2, 4, 5]. Отдельные минеральные формы элементов платиновой группы (ЭПГ) выявлены лишь в некоторых место-

рождениях железистых кварцитов Канады, Бразилии, Австралии, Украины [5, 6, 7, 8]. В России несколько минералов платиноидов (сперрилит, рутениридосмин, осмий самородный, платиридосмин, платосмиридий) были впервые установлены в Михайловском железорудном месторождении КМА [3, 9].

Последующие специальные исследования позволили существенно расширить сведения о минералогии ЭПГ и Au в железистых кварцитах этого региона. Объектом изучения форм нахождения благородных металлов являлись различные по составу железистые кварциты одного из крупнейших в регионе Лебединского железорудного месторождения (рис.1). В продуктивной, в различной степени обогащенной сульфидами и углеродистым веществом, коробковской свите курской серии этого месторождения выделяются две железорудные и две сланцевые подсвиты. Основными минеральными типами кварцитов являются магнетитовые (свыше 50 % продуктивной свиты), гематит-магнетитовые, силикатно (амфибол, -биотит и -эгирин)-магнетитовые и слаборудные кварциты с прослоями и линзами (мощностью до 14 м) магнетит-сульфидно-карбонатных пород, получивших название лебедениты. Разнообразие минеральных типов и разновидностей

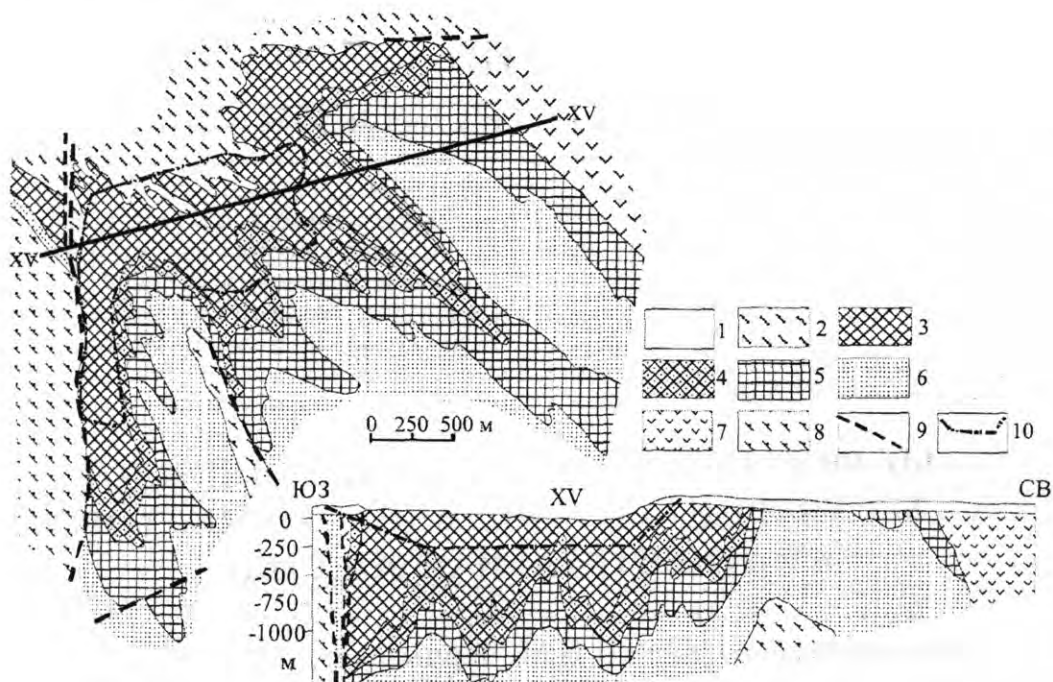


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Лебединского месторождения КМА и разрез по XV [1]:

1 – осадочные породы чехла (на разрезе); нижний протерозой – курская серия: 2-5 – коробковская свита: 2 – верхняя сланцевая подсвита (PR¹kr), 3 – верхняя железорудная подсвита (PR¹kr), 4 – нижняя сланцевая подсвита (PR¹kr), 5 – нижняя железорудная подсвита (PR¹kr); 6 – стойленская сланцево-кварцито-песчаниковая свита (PR¹st); 7 – стойло-николаевский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс (удPR¹sn); верхний архей: 8 – лебединская свита (AR¹lb) михайловской серии; 9 – геологические разломы; 10 – границы карьера

тей железистых кварцитов отчетливо проявляется в их химическом составе (табл.1).

Содержание ЭПГ и Au в железистых кварцитах, их разновидностях и метасоматических образованиях приведены в табл.2. В целом характер распределения благородных металлов определяется, прежде всего,

содержанием сульфидов, максимальные концентрации которых приурочены к контакту железистых кварцитов и внутрирудных углеродсодержащих сланцев, выступающих наиболее мощным барьером для накопления серы. Кроме того, в пределах месторождения широко развиты разномасштабные по мощности (от 1-2 м до

Таблица 1

Химические анализы железистых кварцитов (мас. %) Лебединского месторождения

	M-25/1	M-26	M-29	M-57	M-119	M-130	Л-К-1	M-28/2	M-52	M-127/2	M-32	M-120/1	M-132
SiO ₂	44,28	36,36	44,48	46,77	46,55	48,84	38,53	43,81	31,91	39,92	34,78	32,53	41,17
TiO ₂	0,28	0,015	0,011	0,04	0,015	0,02	0,003	0,01	0,04	0,004	0,06	0,05	0,29
Al ₂ O ₃	0,66	0,96	0,60	1,90	0,79	0,84	0,71	0,53	0,85	0,88	1,02	0,78	1,00
Fe ₂ O ₃	34,98	38,83	42,36	33,36	32,27	30,65	40,96	37,34	50,86	32,72	42,77	36,02	40,94
FeO	10,77	13,02	8,75	13,44	13,74	15,48	10,13	12,77	8,74	14,32	13,56	15,37	11,67
MnO	0,083	0,18	0,045	0,046	0,087	0,03	0,12	0,07	0,04	0,05	0,09	0,16	0,05
MgO	2,06	3,35	1,85	2,98	1,58	2,46	3,85	3,15	2,43	3,58	3,13	4,24	1,98
CaO	0,62	2,82	0,51	0,25	2,75	0,64	1,00	1,45	1,61	3,31	2,68	3,53	2,00
Na ₂ O	6,06	0,65	0,4	0,08	0,26	0,26	4,00	0,21	0,32	0,18	0,23	4,48	0,48
K ₂ O	0,09	0,3	0,031	0,73	0,085	0,22	0,08	0,09	0,03	0,18	0,08	0,12	0,09
P ₂ O ₅	0,067	0,078	0,12	0,124	0,13	0,08	0,11	0,09	0,23	0,24	0,28	0,16	0,40
п. п. п.	не обн.	3,26	0,68	не обн.	1,58	0,38	0,30	0,20	2,82	4,34	1,20	2,53	не обн.
Сумма	99,95	99,82	99,84	99,72	99,84	99,9	99,79	99,72	99,88	99,72	99,88	99,97	100,07

Примечание: M-25/1 – эгириновый железистый кварцит; M-26 – куммингтонитовый железистый кварцит; M-29 – биотит-щелочноамфибол-карбонатный железистый кварцит; M-57 – актинолит-тремолитовый железистый кварцит; M-119 – тремолит-актинолитовый железистый кварцит; M-130 – карбонат-актинолит-кумингтонитовый кварцит; Л-К-1 – железистый кварцит; M-28/2 – биотит-актинолитовый железистый кварцит; M-52 – карбонатсодержащий железистый кварцит; M-127/2 – актинолит-карбонатный железистый кварцит; M-32 – биотит-актинолит-карбонатный железистый кварцит; M-120/1 – карбонат-тремолит-щелочноамфиболовый железистый кварцит; M-132 – карбонат-щелочноамфиболовый железистый кварцит. Анализы выполнены в лаборатории ИМГРЭ.

Таблица 2

Содержание Pt, Pd и Au (г/т) в различных типах железистых кварцитов и сопутствующих им породах Лебединского месторождения

	1 (1)	2 (1)	3 (2)	4 (1)	5 (1)	6 (2)	7 (3)	8 (3)	9 (1)	10 (1)	11 (1)	12 (1)
Pt	0,12	0,03	0,03	0,01	0,04	0,03	0,04	0,09	0,11	0,22	0,38	<0,03
Pd	0,005	0,15	0,11	0,13	0,005	0,17	0,37	0,32	0,50	0,14	0,10	0,26
Au	0,37	0,56	0,19	0,05	0,19	0,13	0,15	0,13	0,22	0,10	0,04	0,05
ΣPt+ Pd+ Au	0,49	0,74	0,33	0,19	0,23	0,33	0,56	0,54	0,83	0,44	0,52	0,34
Pd/ Pt	0,04	5,00	3,70	1,30	0,12	5,60	9,20	3,60	4,50	0,64	0,26	8,60

Примечание: Название пород: 1 – эгиринизированный магнетитовый кварцит с сульфидами; 2 – сульфидизированный железистый (гематит-магнетитовый) кварцит; 3 – биотитовый магнетитовый кварцит сульфидизированный; 4 – малорудный железистый кварцит с сульфидами; 5 – малорудный биотитовый кварцит; 6 – сульфидизированный железистый кварцит из зоны контакта с углеродсодержащими сульфидизированными (внутрирудными) сланцами; 7 – внутрирудные сульфидизированные углеродсодержащие сланцы; 8 – магнетит-сульфидно-карбонатная порода (лебединит); 9 – 12 – метасоматические жильные образования: жила крупнокристаллического эгиринина с сульфидами из магнетитовых кварцитов (9); сульфидная жила из магнетит-кумингтонитового кварцита (10); карбонат-кварцевая сульфидсодержащая жила из магнетитового кварцита (11); кварцевая жила с сульфидами из железистых кварцитов (12). Анализы выполнены в лаборатории ИГЕМ РАН, спектрохимический метод, аналитик Белоусов Г.Е.

50 м) и протяженности (от 250-300 м до 1500-2100 м) зоны сульфидизации, в различной мере затрагивающие все типы железистых кварцитов.

С целью установления общих закономерностей распределения и выявления возможных форм нахождения благородных металлов, а также отработки подходов и принципов технологии обогащения и извлечения ЭПГ и Au в карьере Лебединского месторождения были отобраны две технологические пробы массой по 30 кг из зон сульфидизации гематит-магнетитовых и существенно магнетитовых кварцитов в непосредственной близости от контакта с внутрирудными углеродсодержащими сланцами. Каждая из двух проб (18/2 – уступ 30 м; 18/4 – уступ 0 м) сульфидизированных железистых кварцитов из зоны контакта нижней рудной подсыты и подсыты межрудных сланцев разделена на две составляющие с последующим определением в них содержания благородных металлов (табл. 3).

Распределение благородных металлов, нормализованное относительно хондрита C1 во всех пробах ахондритовое, характеризующееся постепенным накоплением легкоплавких платиноидов в ряду от Ni к Os → Ir → Ru далее к Pt → Pd → Au и затем к Cu (рис. 2).

Наиболее обогащенной оказалась проба углеродсодержащих безрудных сульфидизированных кварцитов (Б18/2), в которой сумма платиноидов более 0,21 г/т и золота – 0,08 г/т; Pd/Pt = 1,57, а отношение легкоплавких платиноидов к тугоплавким составляет более 3,5. Еще более высокими концентрациями благородных металлов отличается флотационный углеродистый концентрат (графитовая фракция), в котором сумма платиноидов более 0,42 г/т. Отношение Pd/Pt = 1,47, а легкоплавких платиноидов к тугоплавким увеличивается до 10,5. Выявление значимых концентраций тугоплавких благородных металлов, особенно рутения и осмия, отчетливо сказывается на особенностях состава минеральных фаз платиноидов в железистых кварцитах Лебединского месторождения.

Последующая обработка и концентрирование проб с целью выявления возможных форм нахождения платиноидов и золота и распределения этих элементов в технологических продуктах осуществлялись по известной методике применительно железистых кварцитов [5, 9], включающей измельчение до крупности < 0,5 мм, гравитационную и магнитную сепарации. Из

Таблица 3

Содержание благородных элементов (г/т) в разновидностях сульфидизированных железистых кварцитов Лебединского месторождения

Элементы	A18/2	B18/2	B18/2У	A-18/4	B18/4
* Ru	0,023	0,032	0,025	0,02	0,018
* Rh	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
* Pd	0,06	0,11	0,25	0,015	0,02
* Ag	0,38	2,62	0,82	0,15	0,28
* Os	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02
* Ir	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01
* Pt	0,03	0,07	0,17	0,12	<0,02
* Au	0,05	0,08	<0,02	<0,02	0,03

Примечание: A18/2 – сульфидизированный слаборудный магнетитовый кварцит; B18/2 – углеродсодержащий безрудный сульфидизированный кварцит; B18/2У – графитсодержащий флотационный продукт из пробы A18/2; A18/4 – сульфидизированный гематит-магнетитовый кварцит; B18/4 – сульфидизированный слаборудный магнетитовый кварцит. Содержание элементов определено методом ISP-MS.

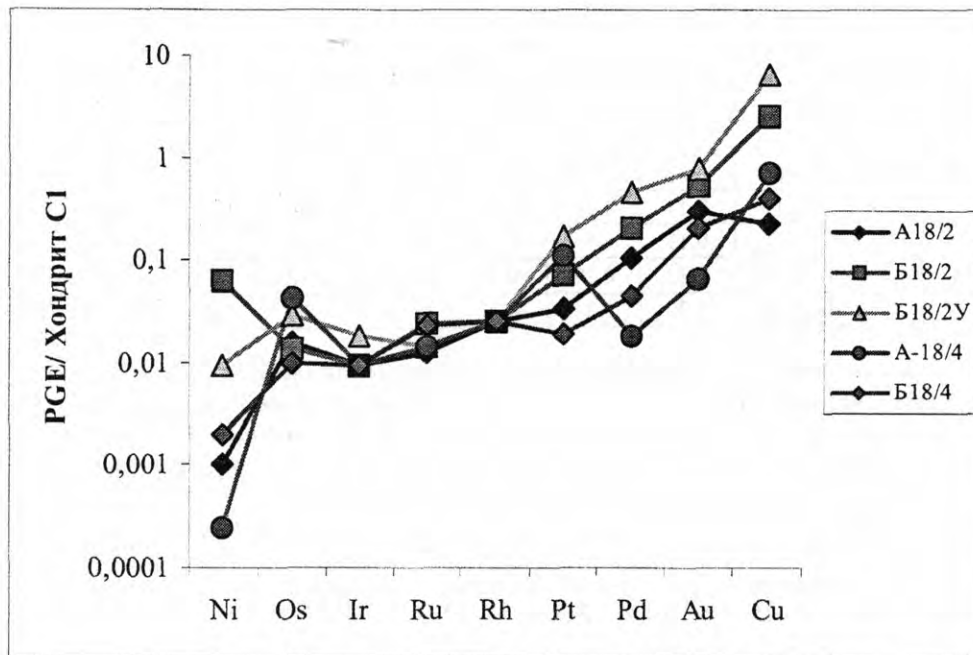


Рис. 2. Нормализованное относительно хондрита распределение благородных металлов в пробах кварцитов Лебединского месторождения

одной половины полученного гравитационного концентрата выполнено определение содержаний благородных металлов пробирным анализом в исходных железистых кварцитах и их технологических продуктах,

показавшие многократное (от 2-5 до 400 и более раз) обогащение Pt, Pd и Au немагнитной фракции и гравиконцентрата (табл.4).

Таблица 4
Содержание (г/т) Pt, Pd и Au в железистых кварцитах и их некоторых технологических продуктах

<i>Проба А18/2 · сульфидизированный слаборудный магнетитовый кварцит</i>					
Технологические продукты	Масса, г	Выход, %	Au	Pt	Pd
Немагнитная фракция	184,2	0,61	2,1	0,88	0,36
Магнитная фракция	4617,6	15,29	0,03	0,02	0,08
Гравитационный концентрат	4801,8	15,9	0,11	0,05	0,09
Хвосты гравитации	25398,2	84,1	0,015	<0,01	<0,01
Исходная проба	30200	100	0,030	0,013	0,019
<i>Проба Б18/2 · углеродсодержащий безрудный сульфидизированный кварцит</i>					
Технологические продукты	Масса, г	Выход, %	Au	Pt	Pd
Немагнитная фракция	35,5	2,52	3,2	1,2	1,2
Магнитная фракция	1,1	0,08	0,045	0,1	0,23
Гравитационный концентрат	36,7	2,6	3,10	1,17	1,17
Хвосты гравитации	1373,3	97,4	0,02	<0,01	<0,01
Исходная проба	1410	100	0,100	0,035	0,035
<i>Проба А18/4 · сульфидизированный гематит-магнетитовый кварцит</i>					
Технологические продукты	Масса, г	Выход, %	Au	Pt	Pd
Немагнитная фракция	321,0	1,31	0,9	0,2	0,3
Магнитная фракция	4539,9	18,53	0,12	0,08	0,03
Гравитационный концентрат	4860,8	19,54	0,17	0,09	0,05
Хвосты гравитации	19639,2	80,46	0,02	<0,01	<0,01
Исходная проба	24500	100	0,050	0,021	0,014
<i>Проба Б18/4 · сульфидизированный слаборудный магнетитовый кварцит</i>					
Технологические продукты	Масса, г	Выход, %	Au	Pt	Pd
Немагнитная фракция	83,6	1,67	0,31	0,05	0,04
Магнитная фракция	663,7	13,26	0,02	0,02	0,02
Гравитационный концентрат	747,2	14,93	0,052	0,023	0,022
Хвосты гравитации	4257,8	85,07	<0,01	<0,01	<0,01
Исходная проба	5005	100	0,012	0,008	0,008

Вторая половина перечищена в чашках с использованием тяжелой жидкости М-45 плотностью $2,82 \text{ г/см}^3$ с получением «ультратяжелой фракции». Легкая фракция доводки растворена в плавиковой кислоте с магнитной сепарацией остатка от растворения. Растворением в кислоте вскрыты зерна рудных (оксидных и сульфидных) минералов из сростаний с кварцем и силикатами. Магнитной сепарацией удалены магнетит, гематит, гидрооксиды железа и силикаты железа. Остатки химической доводки легкой фракции объединены с «ультратяжелой» фракцией гравитационной

доводки. Весь материал этого продукта пошел на изготовление препаратов для локальных рентгеноспектральных исследований, в результате которых впервые в железистых кварцитах установлено значительное количество собственных минеральных фаз ЭПГ: самородный рутений и осмий, минералы ряда осмий, рутений и иридий, ряда рутений, платина, родий, а также прассоит (или миассит), сперрилит. Их химический состав и кристаллохимические формулы приведены в табл. 5, а формы выделения иллюстрируются рядом рисунков (рис. 3).

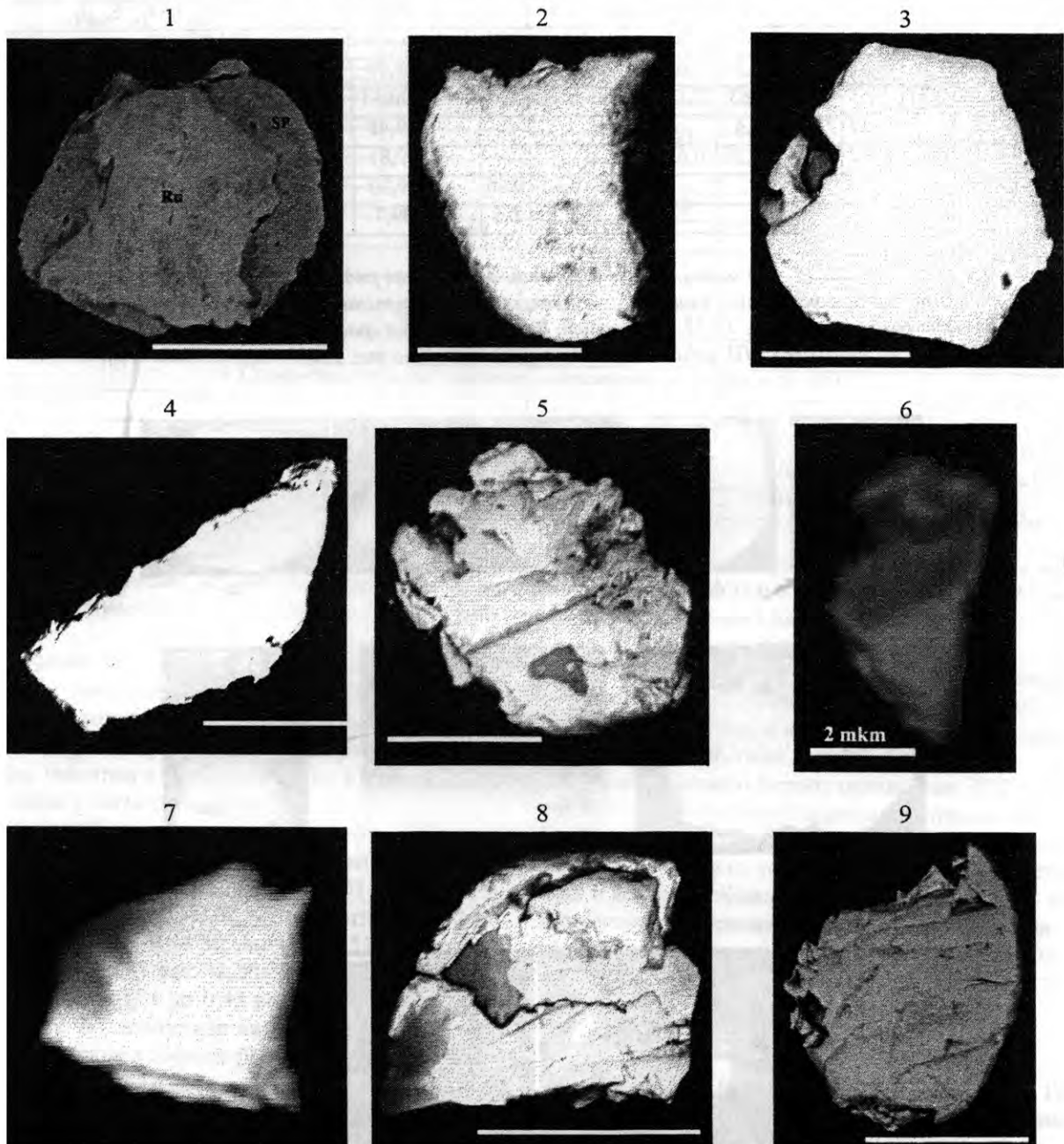


Рис. 3. Формы выделения минералов ЭПГ из железистых кварцитов Лебединского месторождения:

1 – самородный рутений с каемкой сперрилита (Зерно G2 –Ru+SP); 2 – самородный осмий (Зерно G3–Os.); 3 – самородный рутений (Зерно G4–Ru); 4 – минерал ряда RuOsIr (Зерно Ag1); 5 – самородный рутений (с примесью платины и родия) и включениями сульфида родия – прассоита (Зерно Ag8–RuPtRh); 6–7 – сперрилит Ag10–SP (6) Ag11–SP (7); 8–9 – зерна рутений-осмий-иридиевого сплава с повышенной концентрацией платины Ag7–RuOsIr (8), Ag9–RuIrOsPt (9).

Мерная линейка, здесь и далее, соответствует 10 мкм

Химический состав минералов платиновой группы в железистых кварцитах Лебединского месторождения

№ пп	Зерно	Pt	Pd	Ir	Os	Ru	Rh	As	S	Fe	Ni	Сумма	Кристаллохимические формулы
<i>1. Сульфидизированный гематит-магнетитовый кварцит (А 18/4)</i>													
1	Ag1	8,52		31,4	39,94	17,78	1,29			0,31	0,42	99,66	$Os_{0,34} Ru_{0,28} Ir_{0,26} Pt_{0,07} Rh_{0,02} Fe_{0,01} Ni_{0,01}$
2	Ag7	9,23		31,33	45,58	12,71	0,75					99,60	$Os_{0,41} Ir_{0,28} Ru_{0,22} Pt_{0,08} Rh_{0,01}$
3	Ag8	44,50		7,61	8,13	27,38	9,43			1,44	0,60	99,09	$Ru_{0,38} Pt_{0,32} Rh_{0,13} Ir_{0,06} Os_{0,06} Fe_{0,04} Ni_{0,01}$
4		5,11				1,86	72,35		20,56			99,88	$(Rh_{16,45} Pt_{0,61} Ru_{0,43} S_{15,00})$
5	Ag9	21,39		34,25	22,45	18,65	0,67			1,87		99,28	$Ru_{0,29} Ir_{0,28} Os_{0,19} Pt_{0,17} Fe_{0,05} Rh_{0,01}$
6	Ag10	56,4						43,6				100,0	$Pt_{0,99} As_{2,00}$
7	Ag11	55,4						43,3	0,8			99,5	$Pt_{0,98} (As_{2,00} S_{0,05})_{2,05}$
<i>2. Углеродсодержащий безрудный сульфидизированный кварцит (Б18/2)</i>													
8	G2	19,94		20,75	15,14	41,97	0,66			0,53		98,99	$Ru_{0,58} Ir_{0,15} Pt_{0,14} Os_{0,11} Rh_{0,01} Fe_{0,01}$
9		51,24	0,73			0,63	5,14	42,79					100,53
10	G3	1,2		19,12	77,76	1,4						99,48	$Os_{0,77} Ir_{0,19} Ru_{0,03} Pt_{0,01}$
11	G4	13,7	0,7	24,92	13,48	46,38	0,63					99,81	$Ru_{0,64} Ir_{0,18} Os_{0,10} Pt_{0,06} Pd_{0,01} Rh_{0,01}$
12	G5	56,80						41,20	0,80	0,40		99,20	$(Pt_{1,01} Fe_{0,02})_{1,03} (As_{1,91} S_{0,09})_{2,00}$
13	G6	56,7						42	0,5	0,5		99,7	$(Pt_{1,01} Fe_{0,03})_{1,04} (As_{1,95} S_{0,05})_{2,00}$

Примечание: 1-2 – минералы ряда осмий, рутений, иридий; 3 – минерал ряда рутений, платина, родий; 4 – прассоит; 5 – минерал ряда рутений, иридий, осмий, платина; 6-7 – сперрилит; 8 – рутений самородный; 9 – сперрилит; 10 – осмий самородный; 11 – рутений самородный; 12-13 – сперрилит. В таблице 4 и 5 в графе «зерно» значки типа G2, G3 и др., Ag1, Ag7 и др. означают зерна минералов ЭПГ и Au и соответствуют зернам на рис. 1, 2

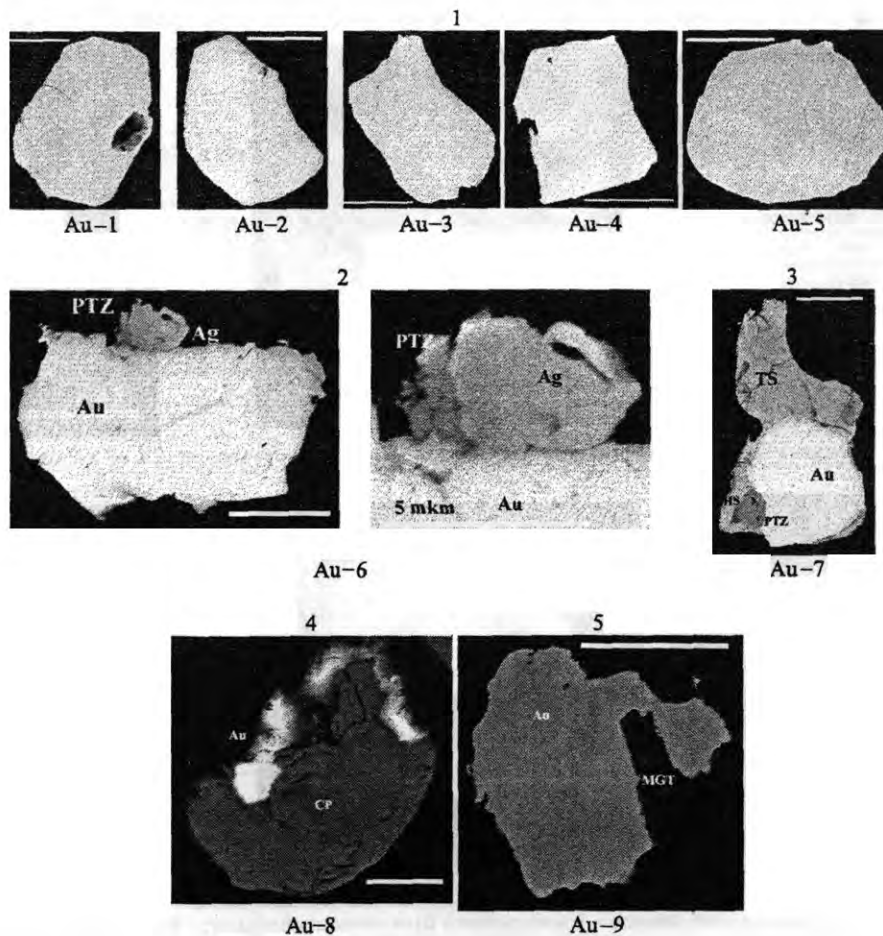


Рис. 4. Формы минералов золота и его сростаний с другими минералами:

1 – самородное золото (Зерна Au—1-5); 2 – сростания самородного золота, серебра и петицита (Зерно Au-6); 3 – сложный сросток самородного золота (Au), окруженный оторочкой цумоита (TS) с включением петицита (светло-серое, слева внизу фото, PTS) и мелким включением гессита (темно-серое, рядом с петицитом, HS) (Зерно Au-7); 4 – сростание самородного золота с халькопиритом (Зерно Au-8); 5 – сростание самородного золота с магнетитом (Зерно Au-9)

Таблица 6

Химический состав самородного золота и ассоциирующих с ним других минералов Au, Ag, Te и Bi в железистых кварцитах Лебединского месторождения (мас. %)

№ п/п	Зерно	Au	Ag	Fe	Cu	Te	Bi	Сумма	Кристаллохимические формулы
<i>1. Сульфидизированный слаборудный магнетитовый кварцит (А 18/2)</i>									
1	Au-1	97,30	1,57	-	1,37	-	-	99,24	Au _{0,96} Ag _{0,03}
2	Au-2	94,35	5,42	-	-	-	-	99,77	Au _{0,91} Ag _{0,09}
3	Au-3	93,98	2,63	-	2,33	-	-	98,94	Au _{0,89} Ag _{0,05} Cu _{0,07}
4	Au-4	81,34	19,32	-	-	-	-	100,66	Au _{0,70} Ag _{0,30}
5	Au-5	98,23	1,02	-	-	-	-	99,2	Au _{0,98} Ag _{0,02}
6	Au-6	96,97	2,06	0,20	0,80	-	-	100,03	Au _{0,93} Ag _{0,04} Fe _{0,01} Cu _{0,02}
7		63,80	35,60	0,43	-	-	-	99,83	Au _{0,49} Ag _{0,50} Fe _{0,01}
8		25,68	40,68	0,28	-	-	32,89	-	(Ag _{2,94} Au _{1,01} Fe _{0,04}) _{3,99} Te _{2,00}
<i>2. Углеродсодержащий безрудный сульфидизированный кварцит (Б 18/2)</i>									
9	Au-7	95,05	4,58	-	-	-	-	99,63	Au _{0,92} Ag _{0,08}
10		1,30	-	-	-	38,67	59,45	99,42	Te _{0,51} Bi _{0,48} Au _{0,01}
11		23,64	42,08	-	-	32,21	-	99,93	(Ag _{3,09} Au _{1,03}) _{4,12} Te _{2,00}
12		1,71	61,09	-	-	34,90	2,32	100,02	(Ag _{1,99} Au _{0,03}) _{2,02} (Te _{0,96} Bi _{0,04})
13	Au-8	82,54	12,36	-	5,62	-	-	100,52	Au _{0,67} Ag _{0,18} Cu _{0,14}
14	Au-9	94,36	5,64	-	-	-	-	99,96	Au _{0,90} Ag _{0,10}
15	Au-10	95,70	4,26	-	-	-	-	99,96	Au _{0,92} Ag _{0,08}
16	Au-11	89,57	9,96	-	-	-	-	99,53	Au _{0,83} Ag _{0,17}
17	Au-12	87,87	6,31	-	5,77	-	-	99,95	Au _{0,75} Cu _{0,15} Ag _{0,10}
<i>3. Сульфидизированный гематит-магнетитовый кварцит (А 18/4)</i>									
18	Au-13	88,71	11,35	-	-	-	-	100,06	Au _{0,81} Ag _{0,19}
19	Au-14	84,85	3,65	-	11,56	-	-	100,06	Au _{0,67} Cu _{0,28} Ag _{0,05}
20	Au-15	95,23	2,14	0,36	2,30	-	-	100,03	Au _{0,89} Cu _{0,07} Ag _{0,04} Fe _{0,01}
21	Au-16	88,24	11,67	-	-	-	-	99,91	Au _{0,81} Ag _{0,19}

Примечание: 1-6 – золото самородное; 7 – сплав золота и серебра; 8 – петцит; 9 – золото самородное; 10 – цумоит; 11 – петцит; 12 – гессит; 13 – золото самородное в ассоциации с халькопиритом (13) и магнетитом (14); 15-21 – золото самородное с примесями Ag, Cu, Fe; (Au-1) – означает зерна золота и ассоциирующих с ними минералов на рис. 2

Минералы ЭПГ ассоциируют с широко распространенным высокопробным (900-939) самородным золотом, для которого характерны тесные сростания с самородным серебром, золото-серебряным сплавом, петцитом, гесситом и цумоитом (табл. 6), халькопиритом и иногда с магнетитом (рис. 4).

Помимо собственных минеральных фаз значительные концентрации ЭПГ и Au установлены [3] в сульфидах и их аналогах – пирите (Pd=0,01-0,10 вес. %, Pt=0,02-0,38 %; Au=0,02-0,62 %), пирротине (Pd=0,01-0,12 вес. %, Pt=0,01-0,44 %; Au=0,09-0,51 %), халькопирите (Pd=0,01-0,11 вес. %, Pt=0,07-0,39 %; Au=0,02-0,27 %), галените (Pd до 0,43 вес. %, Pt=0,31-0,37 %; Au=0,06-0,22 %), теллуриде висмута (Pt=1,28 вес. %; Au=0,27 %), а также в борните (Pd до 0,14 вес. %), теннантите (Pd = 0,08 вес. %) и арсенопирите (Pt=0,18 вес. %).

Следует особо подчеркнуть, что микронзондовыми исследованиями не обнаружены минералы палладия, хотя содержание этого металла часто превышает содержание золота. Причинами этого явления могут быть: а) присутствие палладия в виде изоморфных примесей в сульфидах, сульфосарсенидах, минералах висмута; б) минеральные фазы палладия при сильном переизмельчении или из-за мелких размеров выделений могут смываться в хвосты при подготовке препарата для электронномикроскопических исследований;

в) палладий находится в форме сорбированных или субмикронных выделений, связанных с углистым веществом кварцитов, и весьма легко теряется при промывке пробы (см. табл. 3, проба Б18/2У).

Новые данные о формах нахождения ЭПГ и Au позволяют использовать выбор реальных технологий попутного извлечения благородных металлов из железистых кварцитов КМА и их техногенных продуктов, выступающих в качестве уникального крупномасштабного источника золото-платинодобычи в Центральной России.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-05-64888).

ЛИТЕРАТУРА

1. Голивкин, Н.И. Железные руды КМА / Н.И. Голивкин, Н.Д. Кононов, В.П. Орлов и др. – М. : Геоинформмарк, 2001. – 616 с.
2. Шелехов, А.Н. Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI в. / А.Н. Шелехов, В.А. Лючкин, Ю.С. Ляховкин // Сб. науч. тр. – М. : Геоинформмарк, 1999. – С. 289-294.
3. Чернышов, Н.М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н.М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.
4. Лючкин, В.А. Предпосылки промышленных месторождений золота на территории КМА / В.А. Лючкин, В.А. Ка-

занцев // Вест. ВГУ. Сер. Геология. – Воронеж, 1997. – № 3. – С. 95-99.

5. Петров, С.В. Благородные металлы в железистых кварцитах и возможность их извлечений / С.В. Петров, В.А. Сентимова // Обогащение руд. – 1998. – № 6. – С. 36-40.

6. Лазаренков, В.Г. Месторождения платиновых металлов / В.Г. Лазаренков, С.В. Петров, И.В. Таловина. – СПб. : Недра, 2002. – 298 с.

7. Минералы благородных металлов : справочник / под ред. О.Е. Юшко-Захарова, В.В. Иванов, Л.Н. Соболева и др. – М. : Недра, 1986. – 272 с.

8. Olivo, G.R., M. Gaunter, M. Bardoux // Miner. Mag. – 1994. – V. 58, № 4. – P. 579-587.

9. Чернышов, Н.М. Первые находки минеральных форм элементов платиновой группы в железистых кварцитах КМА (Центральная Россия) / Н.М. Чернышов, В.М. Изойтко, С.В. Петров и др. // Доклады РАН. – 2003. – Т. 391, № 1. – С. 104-107.

УДК 549.221(571.56)

О ГЕНЕЗИСЕ АЛМАЗОВ V РАЗНОВИДНОСТИ ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ им. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

В.П. Афанасьев*, Н.Н. Зинчук**, П.В. Гриб***, А.Л. Рагозин*,
Г.М. Рылов*, А.А. Томиленко*, А.В. Уханов****

*ИМП СО РАН, г. Новосибирск,

**АК «АЛРОСА» (ЗАО), г. Мирный, Респ. Саха (Якутия),

***АК «АЛРОСА-Поморье», г. Архангельск,

****ГЕОХИ СО РАН, г. Москва

На основе комплексного минералогического изучения алмазов V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова из месторождения им. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция), включающего физиографическую характеристику, изучение структурных особенностей, определение изотопного состава углерода, исследование магнитных, геохимических, оптических особенностей, определение состава флюидных включений, выдвинута гипотеза о субдукционном генезисе данных алмазов. Данная гипотеза подтверждается данными по геохимии кимберлитов Золотичного поля, наличия в кимберлитах большого количества эклогитов группы С, имеющих субдукционный генезис. Ранее субдукционный генезис был предположен для алмазов V-VII разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. Сопоставление якутских и архангельских алмазов показывает черты как сходства, так и различия между этими разновидностями алмазов. Сходство отмечается в физиографических особенностях, которые и позволили отнести их к V разновидности в полном соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова. Однако по другим признакам имеются отличия, в частности по изотопии углерода, по оптическим и структурным особенностям, по составу флюидной фазы во включениях, по геохимическим особенностям. Возникает вопрос, можно ли относить эти алмазы к одной разновидности в соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова и каковы рамки применимости самой классификации. Рассмотрена история появления классификации Ю.Л. Орлова, делается вывод, что ряд разновидностей алмазов, в том числе V и VII, выделены на материале россыпей северо-востока Сибирской платформы и применение классификации в других алмазоносных регионах вызывает затруднения и ошибки, как в описанном случае с алмазами V разновидности из месторождения им. Ломоносова. Архангельские и якутские алмазы, относимые к V-VII разновидности, имеют одинаковый генезис – субдукционный, но связаны с разными субдукционными событиями, в разное время, в разных местах, в разной геологической обстановке, что и обуславливает различия их минералогических особенностей. Предложена новая номенклатура алмазов, в соответствии с которой алмазы делятся на мантийные и субдукционные, показан набор характеристических особенностей каждой из этих категорий алмазов.

В процессе выполнения работы были использованы некоторые уникальные методики исследований; в частности, впервые в мире исследованы магнитные свойства алмазов; определены геохимические особенности алмазов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении и с помощью LAM ICP MS (масс-спектрометрия на индуктивно связанной плазме с лазерной абляцией вещества), дана интерпретация полученным данным.

Введение

Предпосылкой постановки данных исследований было обнаружение алмазов так называемой V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [1] в кимберлитах месторождения Ломоносовское. Сведения об этом были опубликованы [2]. Данное обстоятельство вызвало у нас большое изумление. Ранее нами детально изучена V-VII разновидность алмазов из россыпи реки Эбелях (север Якутской алмазоносной провинции), определен широкий круг характеристических особенностей этих алмазов [3, 4]. Нами обос-

новано происхождение этих алмазов из неизвестного, возможно базитового, типа источников алмазов весьма вероятно докембрийского возраста, предположен субдукционный генезис данных алмазов, а также возможность того, что в коренном источнике (источниках) присутствовали только эти алмазы, т.е. ассоциация алмазов была моногенная; индикаторные минералы, сопровождающие данные алмазы, не выявлены [3, 4]. Совершенно иная ситуация в архангельском месторождении: алмазы V разновидности находятся в среднепалеозойском кимберлите и сопровождаются полигенной смесью других алмазов, а также обычными индикатор-