

**БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОСОДЕРЖАЩИЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ  
СУЛЬФИДОВ И ИХ АНАЛОГОВ В ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КМА (ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)****Н. М. Чернышов***Воронежский государственный университет*

Установлена ведущая роль минеральных парагенезисов сульфидов и их аналогов в распределении благородных металлов и их многочисленных собственных минеральных фаз: самородные Au, Ag, Os, Ru, рутениридосмин, платрутеносмиридий, иридротосмид, минералы ряда Ru, Ir, Os, Pt → Ru, Pt, Rh → Os, Ru, Ir, электрум, кюстелит, Au-Ag сплавы, прассоит, маккинстриит, мончеит, сперрилит, петцит, гёссит, креннерит и др. в железистых кварцитах месторождений КМА. Значительными примесными концентрациями благородных металлов характеризуются сульфиды (пирротин, пирит, халькопирит, галенит, борнит и др.), сульфоарсениды, антимониды, теллуриды и висмутиды. Выявлен ряд различных по температурным условиям формирования минеральных парагенезисов: а) Au — креннерит-пирит (T=380-300°C); б) золото-полиметаллический (Au-халькопирит-галенит-борнит; T=280-180°C); в) Au-петцит-гессит (T=250-150°C и до 100°C при появлении в этом парагенезисе маккинстриита).

В мегаблоке КМА докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива (ВКМ) находится около 60 железорудных месторождений, в том числе ряд крупных и супергигантских [3], которые обрабатываются тремя ГОКаами, обеспечивая около 53% добываемого в стране железорудного сырья. Важнейшим компонентом железистых кварцитов (в объеме курской серии), а также сформировавшихся за их счет залежей богатых железных руд доверхневизейской коры выветривания и гигантских по объему (свыше 1,2 млрд.т) промпродуктов (прежде всего хвостоотвалов) горнорудных предприятий являются благородные металлы, выступающие в качестве одного из крупнейших нетрадиционных источников селективной и попутной золото-платинодобычи XXI столетия.

Золото-платиносодержащие железорудные толщи курской серии нижнего карелия в мегаблоке КМА образуют две, пространственно сопряженные с Белгородско-Михайловским и Орловско-Тимским коматиитсодержащими зеленокаменными поясами позднеархейского заложения [6], сложные по морфологии и внутреннему строению протяженные (свыше 400 км) зоны северо-западного простирания: а) западную, в которой размещается Михайловский железорудный район и б)

восточную — с одним из крупнейших Лебединским месторождением (Старооскольский рудный район).

В пределах Михайловского и Лебединского месторождений, среди разнообразных по составу железистых кварцитов (гематит-магнетитовые, магнетит-гематитовые, магнетитовые, силикатно (куммингтонит, рибекит-акмитовые амфиболы, биотит)-магнетитовые, карбонат-магнетитовые и других типов руд) выделено [9] 5 генетических типов золото-платинометалльного оруденения (табл. 1).

В целом повышенные концентрации благородных металлов приурочены прежде всего к ореолам наиболее интенсивных сульфидизированных пространственно сопряженных, разновозрастных и разноранговых (метаморфогенно-метасоматических, гидротермально-метасоматических и гипергенно-метасоматических) преобразований, обусловивших многократное перераспределение и накопление практически значимых концентраций Au, ЭПГ и других металлов. При этом ведущая роль в распределении благородных металлов принадлежит зонам сульфидизации, наиболее полно проявившихся в пределах Лебединского железорудного месторождения (рис. 1).

Генетические типы золото-платинометалльного оруденения Михайловского и Лебединского железорудных месторождений (в возрастной последовательности)

Генетический тип	Содержание Au, Pt, Pd (г/т)	Тип минерализации	Рудные залежи	Практическое применение
1. Осадочно-метаморфогенный	Au=0,01-0,12; ЭПГ до 0,05	Рассеянный	Пластовые тела среди железистых кварцитов	Попутное извлечение из продуктов переработки железных руд
2. Метаморфогенно-метасоматический	Au=0,25-4,83; Pt=0,12-0,30; Pd=0,58-0,77	Концентрированный	Стратиформные залежи	Самостоятельные золото-платиноидные объекты контактовых зон кварцитов со сланцами (селективная отработка)
3. Гидротермально-метасоматический	Au=0,01-0,12, иногда до 35,8; ЭПГ до 0,3-0,5	Концентрированный	Секущие жилы, линзы среди железистых кварцитов	Самостоятельные, преимущественно золоторудные объекты для селективной отработки
4. Гипергенно-метасоматический	Au=0,64-4,30, иногда до 41,7; ЭПГ до 1,0	Концентрированный	Секущие жилы, линзы	Самостоятельные платиносодержащие золоторудные объекты (селективная отработка)
5. Базальные горизонты зон несогласий (докембрий-фанерозой)	Au=0,53; Pd=1,7; Pt=0,15; PЗЭ=556,3; U=12,2-23,6	Концентрированные	Пластовые тела сульфидизированных органогенно-фосфатных пород девона и коры выветривания в кровле железорудных месторождений	Самостоятельные уран-редкоземельно-благородсодержащие-нометалльно породы и другие объекты во вскрышных породах (селективная отработка)

Особенностью Лебединского месторождения является многообразие минеральных видов железистых кварцитов, которые характеризуются широкими вариациями химического состава (табл. 2) и концентрациями Pt, Pd, Au и S (табл. 3).

Таблица 2

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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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: железистые кварциты — M-25/1 — эгириновый; M-26 — куммингтонитовый; M-29 — биотит-щелочноамфибол-карбонатный; M-57 — актинолит-тремолитовый; M-119 — тремолит-актинолитовый; M-130 — карбонат-актинолит-куммингтонитовый; Л-К-1 - железистый кварцит; M-28/2 — биотит-актинолитовый; M-52 — карбонатсодержащий; M-127/2 — актинолит-карбонатный; M-32 — биотит-актинолит-карбонатный; M-120/1 — карбонат-тремолит-щелочноамфиболовый; M-132 — карбонат-щелочноамфиболовый. Анализы выполнены в лаборатории ИМГРЭ.

Таблица 3

Содержание Pt, Pd и Au (г/т) в различных типах сульфидизированных 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
Σ Pt+ 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
S	0,3	0,33	0,1-0,5	0,05	0,3	0,3-7,0	0,2-10,0	2,0-15,0	10,0	-	-	-

Примечание: Название пород: 1-6 — кварциты: 1 — эгиринизированный магнетитовый; 2 — гематит-магнетитовый; 3 — биотит-магнетитовый; 4 — малорудный; 5 — малорудный биотитовый; 6 — кварцит из зоны контакта с внутрирудными сланцами; 7 — углеродсодержащие сланцы; 8 — магнетит-сульфидно-карбонатная порода (лебеденит); 9 — 12 — метасоматические сульфидсодержащие жильные образования. Анализы выполнены в лаборатории ИГЕМ РАН, спектрохимический метод, аналитик Белоусов Г.Е.

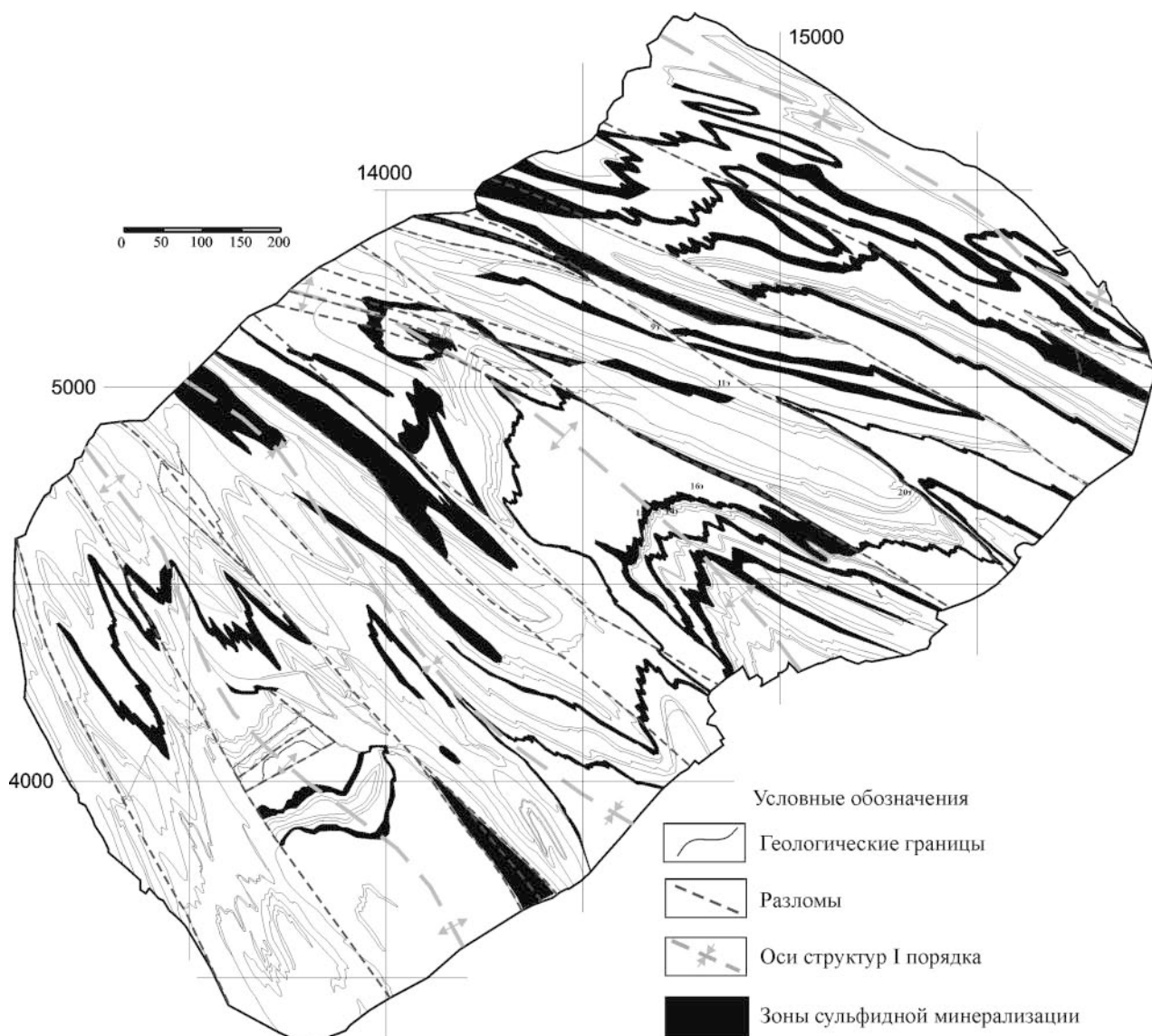


Рис. 1. Карта зон сульфидной благороднометалльносодержащей минерализации на Лебединском железорудном месторождении (в рамках обрабатываемого карьера)

С целью установления особенностей распределения и выявления возможных форм нахождения благороднометалльной минерализации, определения ведущих минеральных парагенезисов золотоплатинометалльного оруденения и возможных условий их формирования на Лебединском месторождении был отработан ряд технологических проб сульфидизированных железистых кварцитов из различных частей разреза курской серии с последующей обработкой по специальной методике [5] с разделением гравитационного концентрата на две части: а) для определения содержания металлов (по фракциям — технологическим продуктам) пробирным анализом и б) получения «ультратяжелой фракции» для выявления минеральных фаз благородных и других металлов.

Анализ распределения всей совокупности благородных металлов, нормализованных относительно хондрита С1 в основных минералогических типах железистых кварцитов (рис.2), выявляет: а) значительные содержания тугоплавких тяжелых платиноидов (от 0,06 до 0,15 г/т); б) наиболее высокие концентрации ЭПГ и Au в сульфидизированных углеродсодержащих рудных и безрудных кварцитах, а также углеродистой (проба Б18/2У) фракции (ЭПГ и Au = 0,52 г/т, в т.ч. Pt=0,17 г/т, Pd=0,25 г/т); в) хондритовый характер распределения с последовательным накоплением легкоплавких платиноидов и Au в ряду от Ni к Os → Ir → Ru, далее к Pt → Pd → Au и, затем, к Cu при преобладании во всех случаях Pd над Pt (Pd/Pt>1,5) и отношении легких платиноидов к тугоплавким (>3,5).

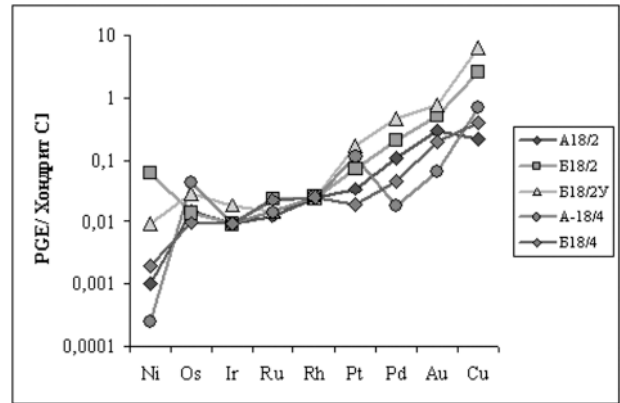


Рис. 2. Нормализованное относительно хондрита распределение благородных металлов в пробах сульфидизированных кварцитов Лебединского месторождения. Пробы кварцитов: А18/2 — сульфидизированный слаборудный магнетитовый; Б18/2 — углеродсодержащий безрудный сульфидизированный; А18/4 — сульфидизированный гематит-магнетитовый; Б18/4 — сульфидизированный слаборудный гематит-магнетитовый кварцит; Б18/2У — графитсодержащий продукт, выделенный из пробы Б18/2.

В технологических продуктах сульфидизированных железистых кварцитов (табл. 4) наиболее высокие концентрации Pt, Pd и Au сосредоточены в немагнитной фракции и гравитационном концентрате. Значительными содержаниями ЭПГ и Au характеризуются флотационные сульфидные концентраты (табл.5).

Таблица 4

Содержание (г/т) Pt, Pd и Au в сульфидизированных железистых кварцитах и их некоторых технологических продуктах Лебединского месторождения

Фракции	Pt	Pd	Au	Pt	Pd	Au	Pt	Pd	Au
	А18/2			А18/4			Б18/2		
1	0,013	0,019	0,030	0,021	0,014	0,050	0,035	0,035	0,100
2	0,88	0,36	2,1	0,2	0,3	0,9	1,2	1,2	3,2
3	0,02	0,08	0,03	0,08	0,03	0,12	0,1	0,23	0,045
4	0,05	0,09	0,11	0,09	0,05	0,17	1,17	1,17	3,10
5	<0,01	<0,01	0,015	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02

Примечание: пробы — А18/2 — слаборудный магнетитовый кварцит; Б18/2 — углеродсодержащий безрудный кварцит; А18/4 — гематит-магнетитовый кварцит. Фракции: 1 — исходная проба; 2 — немагнитная фракция; 3 — магнитная фракция; 4 — гравитационный концентрат; 5 — хвосты гравитации; н.о. — содержание элемента не определялось.

При сравнительно невысоком выходе сульфидного концентрата (от 1,26 % до 5,26 %) на его долю приходится 30—80 % Pt и Pd и около 55 % Au.

Золото-платинометалльное оруденение в железорудных месторождениях характеризуются слож-

ным многокомпонентным, полиминеральным составом (свыше 60 рудных минералов), в том числе около 20 собственных минеральных фаз ЭПГ, Au и сопутствующих им элементов (Ag, Te, Bi), представленных [5, 8]: а) самородными металлами,

металлическими твердыми растворами, интерметаллическими соединениями (самородные Au, Os, Ru, Pt, рутениридосмин, платрутеносмиридий, иридрутосмид, минералы ряда Ru, Ir, Os, Pt → Ru, Pt, Rh → Os, Ru, Ir, электрум, кюстелит и др.; б)

сульфиды (прассоит, маккинстриит); в) сульфосарсениды, теллуриды, висмутиды, антимониды и др. (мончеит, сперрилит, петцит, гёссит, креннерит, пумаит, а также хедлиит платиносодержащий, жозеит, тетрадимит; табл. 6).

Таблица 5

Результаты анализа флотационных концентратов из сульфидизированных магнетитовых кварцитов

Пробы	Выход сульфидного концентрата, %	Pt	Pd	Au	Минеральный состав флотоконцентрата
528-Б	5,26	0,3	0,48	14,4	Пирит (36 %), группа пирротина (38 %), халькопирит (3 %), марказит (2 %), сфалерит (1 %), галенит (0,5 %), арсенопирит (0,5 %), ед.зн. — леллингит, герсдорфит, молибденит, кобальтин, борнит, блеклая руда. Прочие — 19 %.
	исходная проба	0,02	0,03	0,96	
520	1,26	0,15	0,26	5,9	Пирит (18 %), группа пирротина (48 %), халькопирит (0,5 %), марказит (5 %), сфалерит (0,2 %), галенит (0,1 %), ед.зн. — арсенопирит, борнит, халькозин, ковеллин. Прочие - 28 %.
	исходная проба	>0,003	>0,005	0,49	
А 18/2	3,11	0,8	0,9	1,2	Пирит (47 %), группа пирротина (34 %), халькопирит (2 %), марказит (2 %), сфалерит (0,3 %), галенит (0,1 %), арсенопирит (1 %), ед.зн. — молибденит, борнит, блеклая руда. Прочие — 14 %
	исходная проба	0,03	0,06	0,05	
Б 18/2	2,85	0,7	0,72	1,7	Пирит (56 %), группа пирротина (19 %), халькопирит (2,5 %), марказит (4 %), сфалерит (1 %), галенит (0,5 %), арсенопирит (1 %), ед.зн. — леллингит, молибденит, халькозин, борнит, блеклая руда. Прочие — 16 %.
	исходная проба	0,07	0,11	0,08	

Примечание: прочие — слоистые силикаты, амфиболы и другие силикаты, карбонаты, углеродистое вещество, гематит, магнетит, ильменит и другие оксиды.

Таблица 6

Рудные минералы золото-платинометалльного оруденения в железорудных месторождениях КМА

Самородные металлы, металлические твердые растворы и интерметаллические соединения	
Золото	1. $Au_{0,96}Ag_{0,03}$ ; 2. $Au_{0,89}Ag_{0,05}Cu_{0,07}$ ; 3. $Au_{0,99}Ag_{0,01}$ ; 4. $Au_{0,90}Ag_{0,10}$ ; 5. $Au_{0,67}Ag_{0,26}Cu_{0,07}$ ; 6. $Au_{0,70}Ag_{0,29}Pd_{0,01}$
Осмий	$Os_{0,77}Ir_{0,19}Ru_{0,03}Pt_{0,01}$ ;
Рутений	$Ru_{0,64}Ir_{0,18}Os_{0,10}Pt_{0,06}Pd_{0,01}Rh_{0,01}$ ;
Рутениридосмин	$Os_{0,44}Ru_{0,39}Ir_{0,1}Ni_{0,03}Cu_{0,02}Pt_{0,01}$ ;
Платрутеносмиридий	$Pt_{0,34}Ru_{0,32}Os_{0,17}Ir_{0,17}$ ;
Иридрутосмид	$Ru_{0,5}Ir_{0,21}Os_{0,19}Pt_{0,08}Rh_{0,01}$ ;
Золото-серебряные сплавы	1. $Au_{0,70}Ag_{0,30}$ ; 2. $Ag_{0,50}Au_{0,49}$
Электрум	1. $Au_{0,48}Ag_{0,52}$ ; 2. $Ag_{0,30}Au_{0,70}$
Кюстелит	$Au_{0,17}Ag_{0,83}$
Минералы ряда:	
рутений, иридий, осмий, платина -	$Ru_{0,29}Ir_{0,28}Os_{0,19}Pt_{0,17}Fe_{0,05}Rh_{0,01}$ ;
рутений, платина, родий -	$Ru_{0,38}Pt_{0,32}Rh_{0,13}Ir_{0,06}Os_{0,06}Fe_{0,04}Ni_{0,01}$ ;
осмий, рутений, иридий -	$Os_{0,41}Ir_{0,28}Ru_{0,28}Pt_{0,08}Rh_{0,02}Fe_{0,01}Ni_{0,01}$
<b>Сульфиды</b>	
Прассоит	$(Rh_{16,45}Pt_{0,61}Ru_{0,43})_{17,49}S_{15,00}$
Маккинстриит	$(Ag_{1,15}Au_{0,10}Fe_{0,10}Cu_{0,66})_{2,01}S$
Гр. Пирротина (моноклинный, гексагональный; троилит, в т.ч. Pt, Pd, Au содержащий)	$Fe_{1-x}S$

Пирит (в т.ч. Pt,Pd,Au содержащий)	FeS <sub>2</sub>
Халькопирит (в т.ч. Pt,Pd,Au содержащий)	CuFeS <sub>2</sub>
Марказит	FeS <sub>2</sub>
Сфалерит	ZnS
Галенит (в т.ч. Pt,Pd,Au,Ag содержащий)	PbS
Молибденит	MoS <sub>2</sub>
Борнит (в т.ч. Pd содержащий)	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>
Халькозин	Cu <sub>2</sub> S
Ковеллин	Cu <sub>2</sub> S·CuS <sub>2</sub>
Пенталандит	(Fe,Ni) <sub>9</sub> S <sub>8</sub>
<b>Сульфоарсениды, теллуриды, антимониды, висмутиды, сульфосоли</b>	
Мончеит	(Pt <sub>0,994</sub> Pd <sub>0,026</sub> (Bi <sub>0,063</sub> Te <sub>1,937</sub> ) <sub>2,00</sub> )
Сперрилит	(Pt <sub>1,01</sub> Fe <sub>0,02</sub> ) <sub>1,03</sub> (As <sub>1,91</sub> S <sub>0,09</sub> ) <sub>2,00</sub>
Петцит	(Ag <sub>3,09</sub> Au <sub>1,03</sub> ) <sub>4,12</sub> Te <sub>2,00</sub> ; (Ag <sub>3,01</sub> Au <sub>0,96</sub> ) <sub>3,97</sub> Te <sub>2,00</sub>
Гессит	(Ag <sub>1,99</sub> Au <sub>0,03</sub> ) <sub>2,02</sub> (Te <sub>0,96</sub> Bi <sub>0,04</sub> )
Креннерит	(Au <sub>0,01</sub> Ag <sub>0,16</sub> ) <sub>1,01</sub> Te <sub>2,00</sub>
Цуманит	Au <sub>0,85</sub> Te <sub>0,51</sub> Bi <sub>0,48</sub>
Хедлиит платиносодержащий	Te <sub>3,00</sub> Bi <sub>6,95</sub> ;
Жозеит-А	Te <sub>1,00</sub> S <sub>2,02</sub> Bi <sub>3,68</sub> ;
Тетрадимит	(Te <sub>2,04</sub> S <sub>1,00</sub> ) <sub>3,04</sub> Bi <sub>2,00</sub> ;
Арсенопирит платиносодержащий	FeAsS
Теннантит	Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
Тетраэдрит	Cu <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
Никелистый кобальтин палладийсодержащий	Co <sub>0,67</sub> Ni <sub>0,27</sub> Pd <sub>0,04</sub> Fe <sub>0,02</sub> ; Co <sub>0,68</sub> Ni <sub>0,22</sub> Fe <sub>0,07</sub> Pd <sub>0,03</sub>
Герсдорфит	NiAsS
Лёллингит никельсодержащий	(Fe <sub>0,82</sub> Ni <sub>0,18</sub> )As <sub>2</sub>
<b>Оксиды, гидрооксиды и др.</b>	
Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ильменит	FeTiO <sub>3</sub>
Рутил	TiO <sub>2</sub>
Касситерит	SnO <sub>2</sub>
Уранинит и настуран	U <sub>2</sub> UO <sub>7</sub>
Бадделеит	ZrO <sub>2</sub>
Гетит	FeO(OH)
Лимонит	FeO(OH)·nH <sub>2</sub> O
Лепидокрокит	FeO(OH)
Сидерит	Fe[CO <sub>2</sub> ]
Ярозит	Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> [SO <sub>4</sub> ] <sub>2</sub>
Барит	Ba[SO <sub>4</sub> ]
Шеелит	Ca(W,Mo)O <sub>4</sub>
Монацит	(Ce,La)PO <sub>4</sub>
Циркон	Zr[SO <sub>4</sub> ]

Примечание: курсивом выделены — минералы, содержащие в своем составе примесные формы благородных металлов.

Важно особо отметить, что на распределение, степень концентрирования и формы нахождения золота и платиноидов существенную роль оказывает место парагенезисов сульфидов и их аналогов в общем длительном процессе формирования благороднометалльного оруденения в высокожелезистых рудообразующих системах [6, 7].

С этим процессом, в частности, связано и многообразие форм проявления преобладающих среди железистых кварцитов сульфидов — пирита и пирротина и сложные их взаимоотношения с оксидами (магнетитом, гематитом) и силикатами. Выделено четыре последовательно сформировавшихся морфотипа пирита: а) послойно расположенные мелкие ксеноморфные зерна, окаймленные магнетитом и имеющие ограниченное распространение (пирит 1); б) ксеноморфные зерна с многочисленными включениями магнетита (пирит 2); в) широко развитые вкрапленные, пятнистые, линзовидные и петельчатые разноразмерные обособления с многочисленными включениями нерудных минералов, пирита 2, пирротина, халькопирита, магнетита, иногда сростаниями с марказитом, халькопиритом, арсенопиритом — (пирит 3); г) кристаллические агрегаты и индивиды в составе поздних сульфидно-кварцевых, сульфидно-кварцево-карбонатных и сульфидно-силикатно-кварцевых жил и прожилков (пирит 4). Более ограниченно развитый пирротин представлен тремя отчетливо выраженными морфотипами: а) дисперсными включениями в магнетите (пирротин 1); б) ксеноморфными и гипидиоморфными зернами в малорудных и безрудных кварцитах, сланцах и метасоматитах; иногда сростками с халькопиритом, пиритом, марказитом и магнетитом (пирротин 2); в) закономерно распределенными включениями в пирите третьего

типа (пирротин 3). Второстепенными рудными минералами зон сульфидизации являются халькопирит, марказит, сфалерит, галенит, арсенопирит, борнит, леллингит, герсдорфит, молибденит, кобальтин, халькозин, блеклые руды, теллуриды висмута.

Состав и распределение в них ЭПГ и Au приведен в таблице 7, анализ которой выявляет [6, 7] высокие концентрации благородных металлов в 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%; Ag=0,06-0,42%), теллуриде висмута (Pt=1,28 вес.%; Au=0,27%), а также в борните (Pd до 0,14 вес.%), теннантите (Pd = 0,08 вес.%), арсенопирите (Pt=0,18 вес.%) и кобальтине (Pd до 2,3 вес.%). Анализ распределения благородных металлов выявляет наиболее высокие концентрации ЭПГ и Au в пирите-3 и пирротине 1-3 зон сульфидной минерализации, к которым приурочены собственные минеральные фазы благородных металлов. Сульфиды и их аналоги совместно с минералами ЭПГ, Au и Ag в таких случаях образуют специфические минеральные парагенезисы, позволяющие оценить место и температурные условия формирования их в длительном процессе благороднометалльного рудогенеза в высокожелезистых системах.

Одним из самых распространенных минералов благородных металлов является золото, которое в тяжелых фракциях присутствует в виде многочисленных свободных изометричных зерен и кристаллов, лишенных обычно включений и зональности (рис. 3).

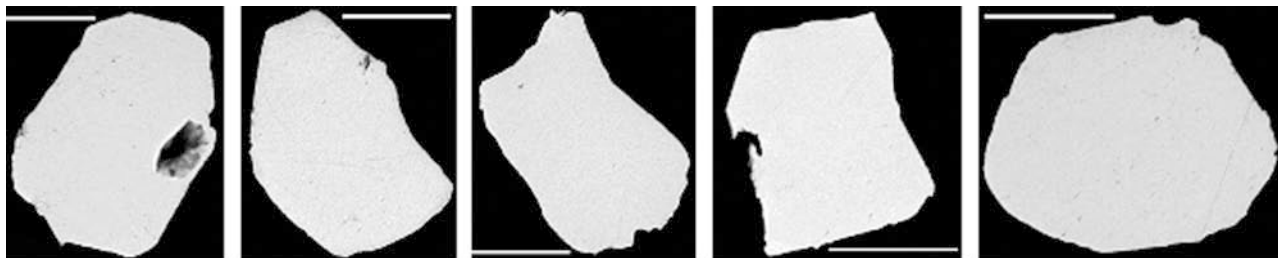


Рис. 3. Зерна самородного золота. Мерная линейка соответствует 10 мкм.

В составе сульфидизированных кварцитов (пробы А18/2, А18/4, Б18/2 в самородном золоте пробностью от 939 до 893 наблюдаются повышенные концентрации меди (до 5,5—11,6 мас. %).

Отмечаются трехфазные зерна самородного золота в сростании со сплавом серебра (Au:Ag=50:50 ат. %) и петцитом (Ag Au Te<sub>2</sub>; рис. 4).

Таблица 7  
Химический состав некоторых благороднометаллосодержащих сульфидов и их аналогов из железистых кварцитов, метасоматитов и рудовмещающих пород Лебединского месторождения

	1 (1)	2 (1)	3 (21)	4 (3)	5 (4)	6 (9)	7 (4)	8 (7)	9 (4)	10 (2)	11 (1)	12 (1)	13 (1)
S	50,09	50,03	49,32—52,47 50,56	48,5—50,02 49,42	36,33—37,98 36,84	37,38—36,06 36,85	35,15—37,69 36,70	31,96—33,08 32,68	13,37—13,88 13,52	25,29—28,28 26,79	25,72	19,89	1,65
Fe	47,53	47,87	47,17—48,94 48,0	47,67—48,17 47,85	61,42—62,12 61,93	59,79—62,05 60,95	59,60—61,32 60,63	30,24—33,27 31,32	0,07—0,98 0,64	11,35—15,34 13,35	2,38	33,72	0,56
Ni	—	0,09	0—0,16 0,05	0—0,10 0,03	0—0,1 0,04	0—0,15 0,07	—	0—0,04 0,02	0—0,03 0,01	—	—	0,04	0,04
Co	—	0,04	0,01—0,10 0,05	0—0,10 0,04	0—0,1 0,05	0—0,1 0,05	0,01—0,04 0,02	0—0,06 0,03	0—0,12 0,03	0—0,02 0,01	—	0,59	0,04
Cu	0,04	0,03	0—0,4 0,03	0—0,12 0,03	0—0,10 0,03	0—0,10 0,03	0,02—2,96 0,75	31,68—34,35 33,63	0—0,08 0,03	51,4—60,11 55,76	42,98	0,03	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	84,89—88,24 86,12	—	—	—	—	5,24
As	0,16	0,08	0—0,20 0,06	0—0,24 0,02	—	—	—	0—0,04 0,01	—	0,01—1,18 0,60	12,61	40,83	1,98
Sb	—	—	—	—	—	—	—	0—0,01 0,00	0—0,01 0	0,04—1,3 0,67	7,13	—	0,27
Bi	—	—	—	0,01—0,05 0,03	—	—	—	0,08—0,13 0,10	0,51—0,99 0,70	0,2—0,24 0,22	0,14	0,02	58,92
Te	—	0,01	0—0,8 0,03	0—0,1 0,04	0—0,06 0,03	0—0,06 0,03	0,01—0,04 0,03	0—0,04 0,02	0,18—0,29 0,22	0—0,01 0,01	0,01	0,07	29,74
Ag	0,02	—	0—0,09 0,02	0—0,05 0,03	0—0,06 0,02	0—0,11 0,03	0,01—0,03 0,01	0—0,08 0,02	0—0,42 0,16	0—0,06 0,03	0,01	—	0,03
Pt	—	—	0—0,38 0,20	0—0,34 0,142	0—0,44 0,18	0—0,44 0,18	0—0,11 0,03	0—0,39 0,18	0—0,32 0,21	—	—	0,18	1,28
Pd	—	0,05	0—0,10 0,03	0—0,05 0,02	0—0,09 0,03	0—0,09 0,03	0—0,04 0,01	0—0,11 0,02	0—0,43 0,13	0,01—0,14 0,08	0,08	—	—
Au	0,05	0,03	0—0,62 0,11	0—0,07 0,04	0,15—0,23 0,13	0—0,57 0,30	0,08—0,37 0,21	0—0,27 0,04	0—0,22 0,10	—	—	—	0,27

Примечание: 1—4 — пириты первой (1), второй (2), третьей (3) и четвертой (4) генераций; 5—7 — пиррогины первой (5), второй (6) и третьей (7) генераций; 8 — халькопирит; 9 — галенит; 10 — борнит; 11 — блеклые руды; 12 — арсенопирит; 13 — теллурид висмута. В числителе — пределы колебания содержания элементов (вес. %), в знаменателе — их среднее содержание. В скобках — количество анализов. Анализы выполнены на микроанализаторе Camebax-100, анализ Л.Н. Коноква (ГЕОХИ РАН).



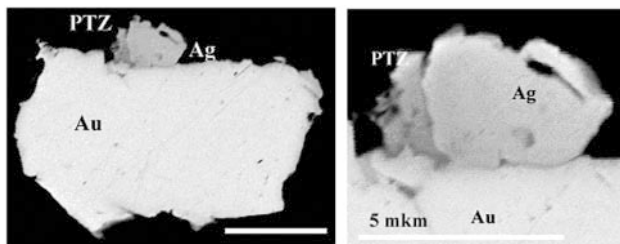


Рис. 4 Срастание самородного золота, серебра и петцита

В отдельных пробах самородное золото облекается цумоитом (BiTe), а на контакте Au и цумоита отмечаются включения петцита ( $Ag_3AuTe_2$ ) и гессита ( $Ag_2Te$ ; рис.5).

Нередки срастания самородного золота с другими минералами: с пиритом и креннеритом ( $AgAuTe_2$ ); с халькопиритом (золото содержит повышенные концентрации  $Cu=5,6$  мас.%), магнетитом (обычно высокопробное золото с серебряной лигатурой), леллингитом ( $(Fe, Ni)As_2$ ), борнитом

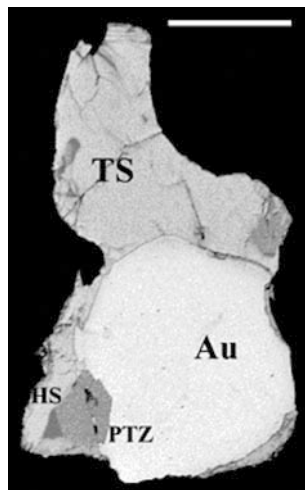
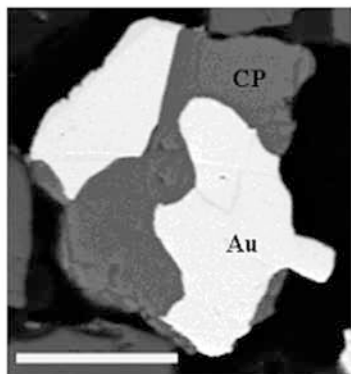
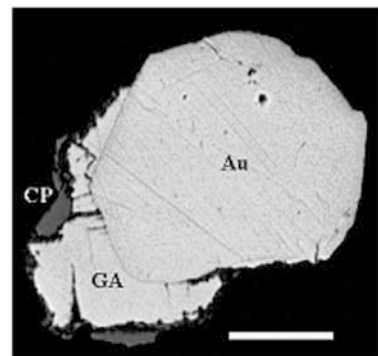
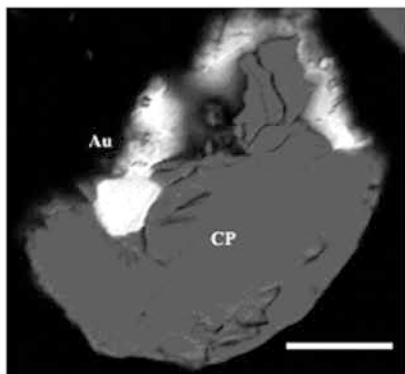


Рис. 5. Сложный сросток самородного золота (Au), окруженный оторочкой цумоита (TS) с включением петцита (светло-серое, слева внизу фото, PTZ) и мелким включением гессита (темно-серое, рядом с петцитом, HS)

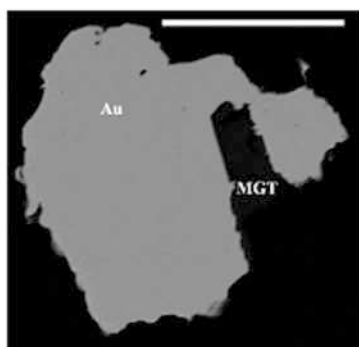
( $Cu_5FeS_4$ ), галенитом (PbS), хедлиитом ( $Te_2Bi_7$ ). Встречаются сложные зональные агрегаты, представленные (от центра к периферии) Au-петцитом-гесситом-маккинстриитом — ( $Ag_{1,15}Au_{0,10}Fe_{0,10}Cu_{0,66}S_{2,01}$ ) (рис.6).



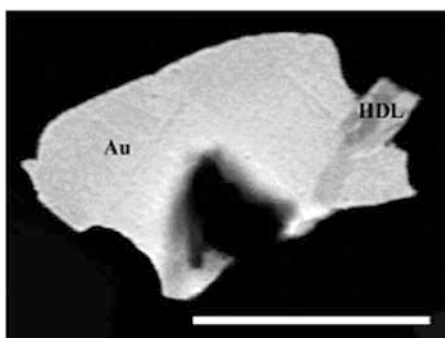
Сложное срастание самородного золота с халькопиритом



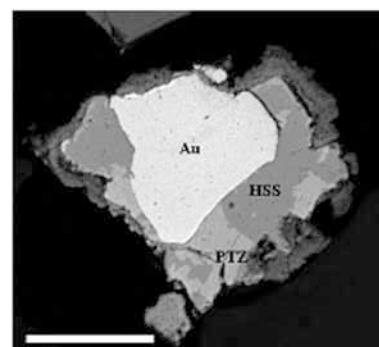
Кристалл самородного золота пробностью 651 в срастании с галенитом и халькопиритом



Срастание самородного золота с магнетитом



Срастание самородного золота с хедлиитом

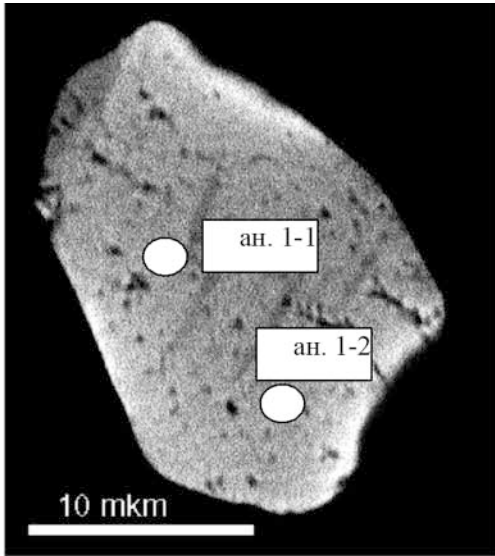


Сложный сросток самородного золота с петцитом и гесситом. Оторочка вокруг сростка — маккинстриит

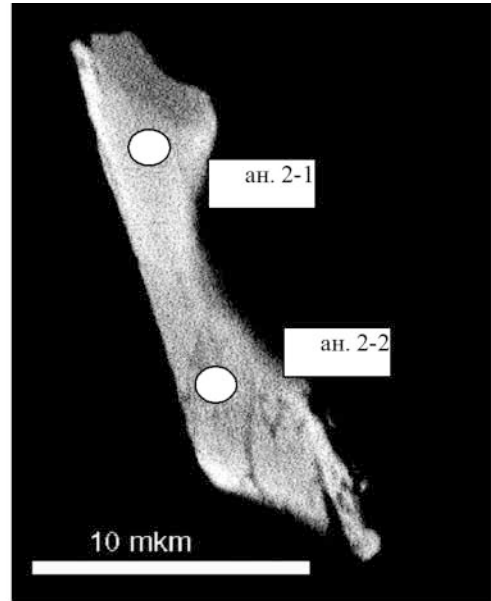
Рис. 6. Сложное срастание самородного золота с другими минералами из железистых кварцитов Лебединского месторождения

В подобных золотосодержащих ассоциациях обнаружен жозеит А ( $\text{Te}_{1,00}\text{S}_{2,02}\text{Bi}_{3,68}$ ), тетрадимит ( $\text{Te}_{2,04}\text{S}_{1,00}$ ) $_{3,04}\text{Bi}_{2,00}$ . В целом же золото-платинометалльная минерализация характеризуется довольно обычными парагенезисами с теллуридами и сульфотеллуридами висмута. В отдельных пробах (проба 520) установлена тесная связь арсенопирит-галенит-халькопирит-пирротиновой минерализации с теллуридами золота и серебра. Весьма харак-

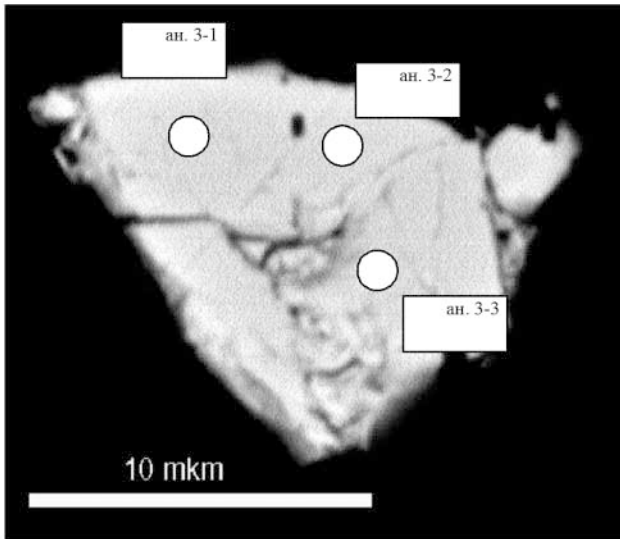
терно, что во всех пробах флотационного сульфидного концентрата появление арсенопирита и других сульфоарсенидов заметно сказывается на возрастании концентраций благородных металлов. В таких пробах присутствует палладийсодержащий кобальтин, мончеит, тесные сростания Au и Ag с леллингитом (рис.7), состав которых приведен в таблице 8.



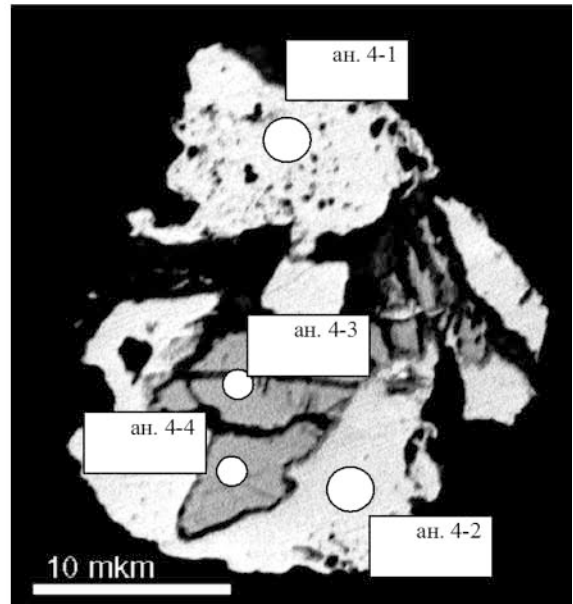
Кристалл кобальтина с примесью палладия



Осколок кристалла кобальтина



Мончеит



Сросток самородного золота (4,1—4,2) с леллингитом (4—3, 4—4)

Рис. 7. Формы выделения благороднометалльносодержащих и других минералов из железистых кварцитов Лебединского месторождения

## Химический состав минералов золота и платиновой группы из сульфидизированных железистых кварцитов

<b>1. Никелистый кобальтин, обогащенный палладием</b>								
Зерно/ анализ	Pd	Fe	Ni	Co	Сумма катионов	S	As	Сумма
1-1	2,3	0,9	9,3	23,5		19,1	44,9	100
	0,036	0,027	0,266	0,669	0,999	1	1,006	
1-2	1,7	2,3	7,8	24,1		19,3	44,8	100
	0,027	0,068	0,221	0,679	0,995	1	0,993	
2-1	0,8	1,8	5,5	27,5		19,4	45	100
	0,012	0,053	0,155	0,771	0,992	1	0,993	
2-2	0,8	1,6	6,4	27,1		19,2	44,9	100
	0,013	0,048	0,182	0,768	1,011	1	1,001	

**2. Мончеит**

Зерно/ анализ	Pd	Pt	Сумма катионов	Bi	Te	Сумма анионов	
3-1	0,6	41,8		4,6	53		100
	0,026	0,980	1,006	0,101	1,899	2	
3-2		42,7		2,9	54,4		100
		0,994	0,994	0,063	1,937	2	
3-3	1,3	41,9			56,8		100
	0,055	0,965	1,020		2	2	

**3. Сросток серебросодержащего самородного золота с леллингитом**

Зерно/ анализ	Au	Ag	Fe	Ni	Co	As	Сумма
4-1	74,3	25,7					100
	0,613	0,387					1,000
4-2	76,7	23,3					100
	0,643	0,357					1,000
4-3			22,3	5,2		72,5	100
			0,825	0,183		2	3,008
4-4			21,6	4,3	1,4	72,7	100
			0,797	0,151	0,049	2	2,997

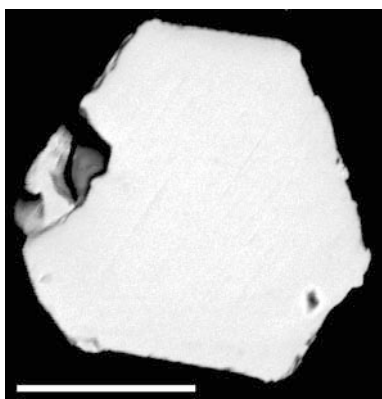
Примечание: в числителе массовые %; в знаменателе — формульные единицы.

Присутствующие в сульфидизированных углеродсодержащих кварцитах минералы платиновой группы принадлежат чаще всего к тугоплавким платиноидам и представлены самородными Ru, Os, Ir, Pt, их твердыми растворами и интерметаллическими соединениями (см. табл. 6). В этой ассоциации присутствуют мелкие (до 10 мкм) зерна сперилита. Отдельные зерна самородного рутения содержат примеси Pt и Rh, а также включения прассоита (миассита —  $Rh_{17}S_{15}$ ; рис. 8).

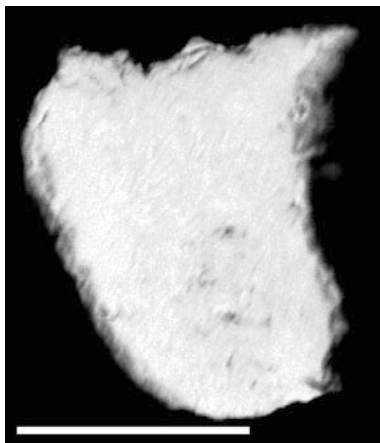
Достаточно хорошо образованные кристаллы минералов платиновой группы характерны для золото-платиносодержащих межрудных углеродсодержащих сланцев (рис. 9).

Анализ пространственно временных соотношений сульфидов и их аналогов с минералами ЭПГ, Au и Ag позволяет предварительно оценить неко-

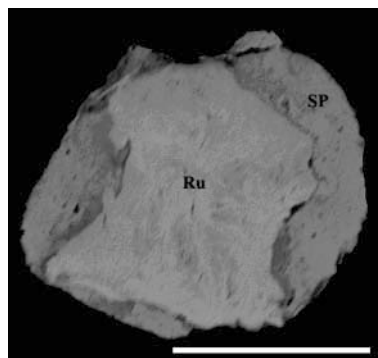
торые (прежде всего температурные) условия формирования золото-платинометалльного оруденения в железорудных месторождениях КМА. Имеющиеся теоретические и экспериментальные данные [1, 2, 4, 10, 11] позволяют в качестве индикаторных выделить три минеральных парагенезиса: 1) Au-креннерит-пиритовый ( $T=380-300^{\circ}C$ ; пробность Au — 654 %); 2) золото-полиметаллический (Au-халькопирит-галенит-борнит;  $T=280-180^{\circ}C$ ; пробность Au в сростаниях с галенитом и халькопиритом — 651—713 %; с галенитом и борнитом — 875 %); 3) золото-петцит-гёсситовый при  $T=250^{\circ}C$  (гёссит-петцит),  $180^{\circ}C$  (золото-гёссит) и  $210-155^{\circ}C$  (золото-петцит-гёссит); при появлении в парагенезисе маккинстриита процесс формирования ассоциации продолжается до  $100^{\circ}C$ . В условиях более высоких температур предпола-



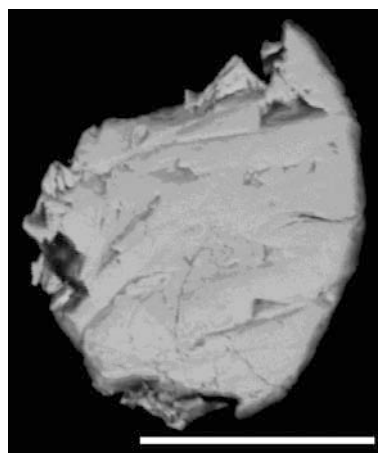
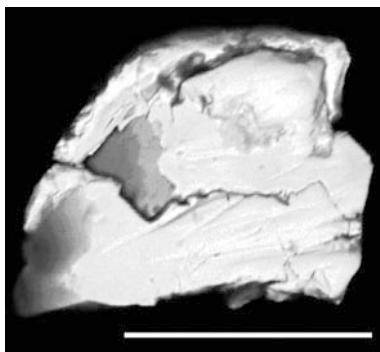
Кристалл самородного осмия



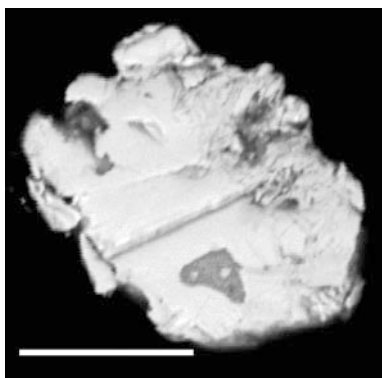
Зерна самородного рутения в пробе углеродсодержащих кварцитов



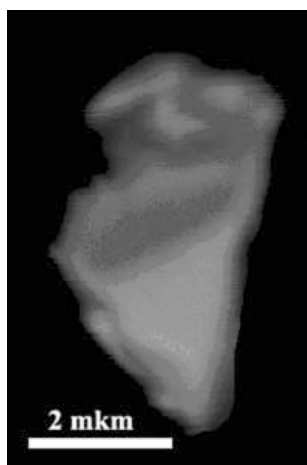
Зерна минералов ряда (Os,Ru,Ir)



Зерно рутений-осмий-иридиевого сплава с повышенной концентрацией платины



Зерно самородного рутения с примесью платины и родия с включением сульфида родия – прассоита (миассита)



Характерные формы выделений сперрилита в тяжелой фракции

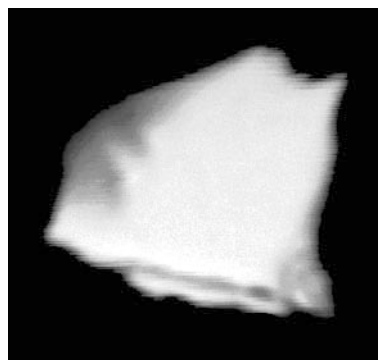
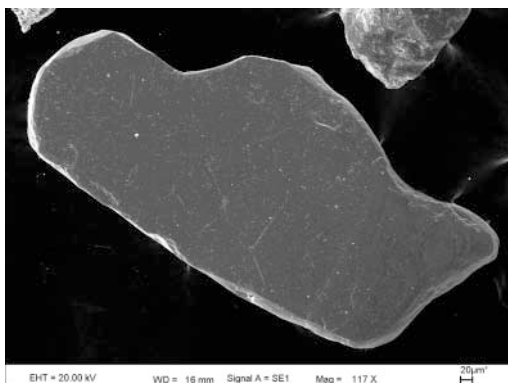
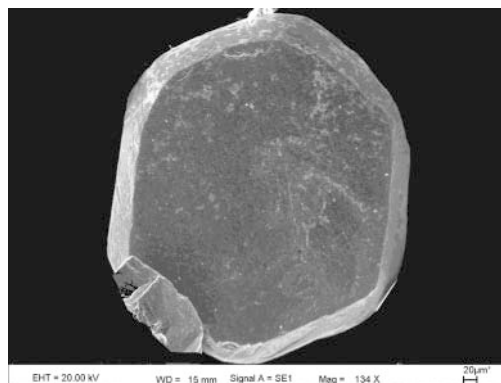


Рис. 8. Формы выделения минералов ЭПГ из железистых кварцитов Лебединского месторождения



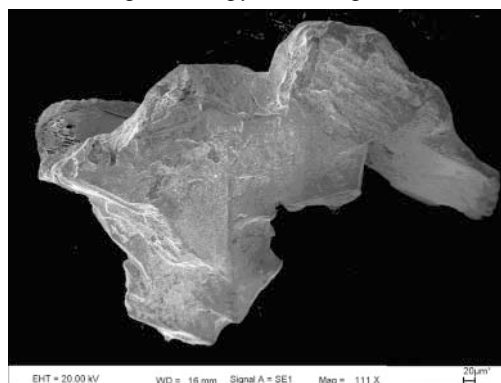
Морфология рутенилосминов



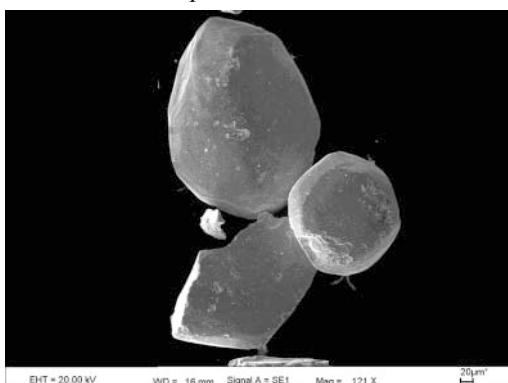
Кристалл рутеносмирида



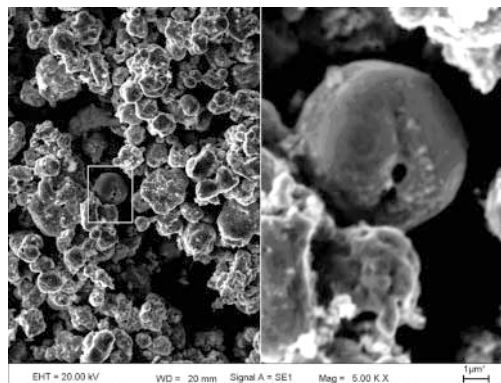
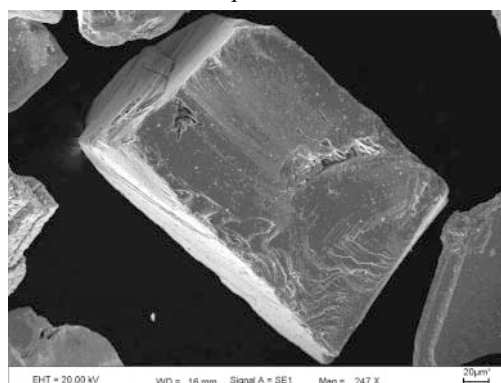
Морфология кристаллических зерен с повышенным содержанием осмия



Ксероморфные зерна с повышенным содержанием иридия



Морфология зерен сперрилита



Морфология и микроструктура платины

Рис. 9. Морфология и микроструктура некоторых минералов платиновых металлов в межрудных углеродсодержащих сланцах

гается формирование арсенопирит-галенит-халькопирит-пиритовой минерализации совместно с теллуридами золота и серебра. В целом золото-платинометалльное оруденение в сульфидных железистых кварцитах и межрудных сланцах имеет преимущественно наложенный характер.

### ВЫВОДЫ

— Среди железорудных месторождений КМА золото-платинометалльное оруденение представлено пятью геолого-генетическими типами: 1 — осадочно-метаморфогенный (пластовые тела среди железистых кварцитов); 2 — метаморфогенно-метасоматический (страгиформные залежи); 3 — гидротермально-метасоматический (секущие жилы, линзы среди железистых кварцитов); 4 — гипергенно-метасоматический (секущие жилы, линзы); 5 — базальные горизонты зон несогласий (пластовые тела сульфидизированных органогенно-фосфатных пород девона и кор выветривания в кровле железорудных месторождений);

— Золото-платинометалльное оруденение в железорудных месторождениях характеризуются сложным многокомпонентным, полиминеральным составом (свыше 60 рудных минералов), в том числе около 20 собственных минеральных фаз ЭПГ, Au и сопутствующих им элементов (Ag, Te, Bi);

— Установлена ведущая роль минеральных парагенезисов сульфидов и их аналогов в распределении благородных металлов и их собственных минеральных фаз. Определены высокие концентрации благородных металлов в 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 %; Ag=0,06—0,42 %), теллуриде висмута (Pt=1,28 вес. %; Au=0,27 %), а также в борните (Pd до 0,14 вес. %), теннантите (Pd = 0,08 вес. %), арсенопирите (Pt=0,18 вес. %) и кобальтине (Pd до 2,3 вес. %);

— Выявлен ряд минеральных парагенезисов, различных по температурным условиям формирования: а) Au — креннерит-пиритовый (T=380—300°C); б) золото-полиметаллический (Au-халькопирит-галенит-борнит; T=280—180°C); в) Au-пет-

цит-гесситовый (T=250—150°C и до 100°C при появлении в этом парагенезисе маккинстриита).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Гамянин, Г.Н.* Ni-Co-арсениды и сульфоарсениды золото-редкометалльных месторождений Восточной Якутии / Гамянин Г.Н., Лыхина Л.И. // Зап. ВМО. — 2000. — №5. — С. 43—50.
3. *Голивкин, Н.И.* Железные руды КМА / Н.И. Голивкин, Н.Д. Кононов, В.П. Орлов и др.; под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. — М.: Геоинформмарк, 2001. — 616 с.
4. *Петров С.В., Головина Т.А.* Минералогия и геохимия благородных металлов во вмещающих породах и рудах Костомукшского месторождения железистых кварцитов (Карелия) // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Геология. — 2006. — № 2. — С. 149—158.
5. *Чернышов Н.М., Изютко В.М., Петров С.В., Молотков С.П.* Первые находки минеральных форм элементов платиновой группы в железистых кварцитах КМА (Центральная Россия) // Доклады РАН, 2003. Т. 391. № 1. С.104—107.
6. *Чернышов Н.М.* Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия). Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. 448 с.
7. *Чернышов Н.М., Коробкина Т.П.* Особенности распределения и формы концентрирования платиноидов и золота в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Геология. — 2005. — № 1. — С. 140—151.
8. *Чернышов Н.М., Петров С.В.* Новые минеральные формы платиноидов и золота в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА (Центральная Россия) // Доклады РАН, 2006. Т. 408. № 4. С. 586—589.
9. *Чернышов Н.М., Попкова Н.В.* Типы золото-платиноносных рудовмещающих систем Михайловского железорудного месторождения КМА. — Воронеж.: Вестн. Воронежского ун-та. Геология, 2006. — №1. — С. 69—77.
10. *Klemm, D.* Synthesen und analysen in den dreiecksdiagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS<sub>2</sub>-CoS<sub>2</sub>-NiS<sub>2</sub> / D. Klemm // N. Jb. Miner. Abh. — 1965. — Bd. 103. — Hf. 3. — P. 96—120.
11. *Gervilla, F.* New data on (Ni, Fe, Co) diarsenides and sulfarsenides in chromite-nicolite ores from the Malaga province, Spain / F.Gervilla, J. Ronsbo // N. Jb. Miner. Mh. Jg. — 1992. — H. 5. — P. 193—206.

Поступила в редакцию 12.12.06 г.