



ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

УДК 549.2/.8:553.3/4:553.491.8.04(47+53)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТАХ МИХАЙЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА И ИХ ТЕХНОГЕННЫХ ПРОДУКТАХ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)

Н.М. Чернышов, С.В. Петров *, С.П. Молотков

*Воронежский государственный университет;
ЗАО «Механобр-Инжиниринг», г. Санкт-Петербург

Приведены новые оригинальные данные об особенностях распределения благородных металлов (прежде всего платиноидов) в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА, в широко развитых среди железорудных толщ золото-платино-палладий-содержащих кварцевых, кварц-сульфидных и пирит-пирротиновых зон минерализации и метасоматитов, а так же в техногенных продуктах (хвостоотвалах) переработки железных руд.

Впервые в России в железистых кварцитах КМА в гравитационном концентрате крупной (200 кг) минералогической пробы электронномикроскопическими исследованиями установлены минералы элементов платиновой группы: сперрилит ($PtAs_2$), рутениридосмин ($Os_{0.44}Ru_{0.39}Ir_{0.1}Ni_{0.03}Cu_{0.02}Pt_{0.01}$), осмий самородный ($Os_{0.92}Ru_{0.06}$), платиносодержащий рутениридосмин ($Ru_{0.5}Ir_{0.21}Os_{0.19}Pt_{0.08}Rh_{0.01}$), платосмиридий ($Pt_{0.34}Ru_{0.32}Os_{0.17}Ir_{0.17}$), ассоциирующие с высокопробным (897-994) самородным золотом.

Известно [1-4], что железистые кварциты, слагающие в пределах всех континентов – Африки (ЮАР, Зимбабве), Австралии, России (КМА, Кольский полуостров), Украине (УЩ), Северной и Южной Америки и других регионов Земли крупные и уникальные месторождения и обеспечивающие 58% мировой добычи железных руд, включают около 5% общего числа промышленных золоторудных объектов.

Важнейшим, но мало исследованным компонентом золотоносных железистых кварцитов являются элементы платиновой группы (ЭПГ), содержание которых в ряде случаев достигает промышленных концентраций как в самих рудах [5-9], так и в продуктах их обогащения [2,10]. В частности, в метасоматически измененных породах кремнисто-железистой формации Среднего Приднепровья (УЩ) сумма благородных металлов (Pt, Pd, Au) достигает 8-16 г/т при содержаниях $Au=0,2-0,8$ г/т [1] и отношении $Pd/Pt=6-10$. Высокие концентрации золота (до 12,5 г/т) установлены в значительной по мощности (около 6 м) и протяженности (600-800 м) сульфидизированной зоне цементации вторичной рудной залежи коры выветривания железистых кварцитов Ингулецкого участка Кривбасса (УЩ). Повышенные содержания благородных металлов ($Au=0,3-1,0$ г/т, иногда до 4,5-7 г/т; $Pt=0,05$ г/т; $Pd=0,2$ г/т) выявлены в линзах сплошных сульфидных пирротин-халькопирит-пиритовых залежах,

приуроченных к лежащему боку железных руд, и в сульфидизированных милонитах Костамукшинского месторождения, а также Оленегорской группы железорудных месторождений (Балтийский щит), в которых содержания Pt (0,05-0,08 г/т) и Pd (до 0,3 г/т) прямо коррелируется с концентрацией золота (Au от 0,02-0,3 г/т, иногда до 12 г/т).

В геологическом разрезе мегаблока КМА [11] выделено [12,13] четыре последовательно сменяющихся во времени железорудных формаций (раннеархейская железисто-кремнисто-гнейсовая в составе обоянского стратифицированного комплекса, позднеархейская железисто-кремнисто-метабазитовая в михайловской серии, протерозойская железисто-кремнисто-сланцевая и железисто-кремнисто-клас-тогенная). Одной из ведущих, обеспечивающих около 53% добываемой в России железной руды, является железисто-кремнисто-сланцевая формация нижнего карелия (в объеме курской серии; рис.1). С этой формацией связано около 60 рудных объектов, в том числе ряд уникальных и крупных месторождений железистых кварцитов и сформировавшихся за счет их богатых железных руд доверхневизейской коры выветривания с сопутствующим золото-платинометалльным оруденением [6,14,15]. Общий потенциал железистых кварцитов и богатых железных руд (71,8 трлн.т) определяют ведущее положение в мире минерально-сырьевой базы Центральной России.

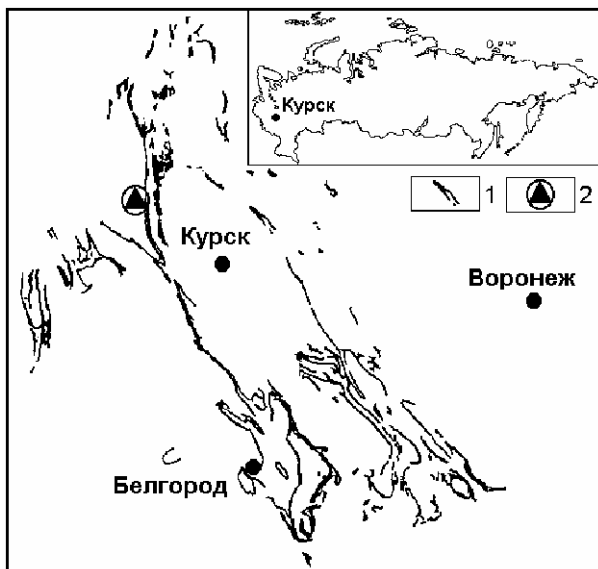


Рис. 1. Схема местоположения Михайловского железорудного месторождения КМА: 1- железистые кварциты (железисто-кремнисто-сланцевая формация нижнего карелия); 2- Михайловское месторождение.

Благородные металлы содержатся как в самих железистых кварцитах и в большей мере в краснополосчатых железно-сланцевых (гематитовых) их разновидностях, а также в широко развитых среди железорудных толщ золото-платиносодержащих кварцевых, кварц-сульфидных зонах минерализации, в пирит-пирротиновых залежах и метасоматитах на контакте железистых кварцитов и сланцев. Отрабатываемые карьерами и шахтами благороднометаллоносительными железными рудами пяти месторождений (Михайловское, Лебединское, Стойлинское, Стойло-Лебединское, Коробковское) перерабатываются тремя ГОКами с формированием в процессе обогащения огромной массы хвостоотвалов, в которых концентрируются значительные ресурсы благородных металлов [6,15-19], при этом наиболее высокими содержаниями золота и платиноидов характеризуются железные руды и их техногенные продукты Михайловского месторождения.

Особенности распределения золота и платиноидов в железных рудах Михайловского месторождения

Рассматриваемое месторождение расположено в Курской области и приурочено к западному борту Михайловской структуры, к участку ее флексуобразного изгиба, осложненному продольными и поперечными разломами, дополнительной складчатостью (рис.2,3). В пределах северной части месторождения (Веретенинская залежь) выделяются синклинали и разделяющая их антиклинальная складка субмеридионального простирания протяженностью от 1 до 6,0 км и размахом крыльев от 0,6 до 2,0 км с падением на восток под углом 50-70° (западные крылья) и 80-85° (восточные крылья).

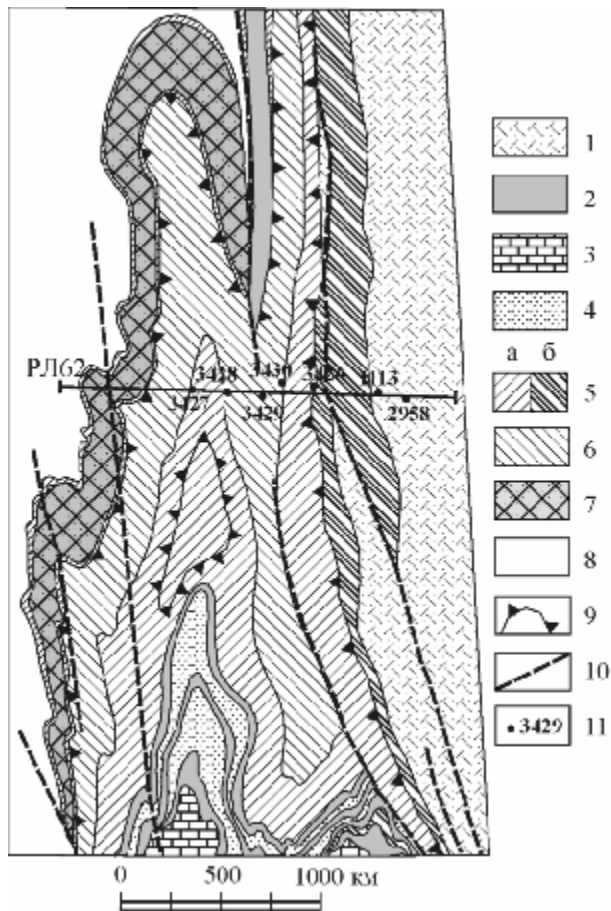


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Михайловского месторождения (в рамках Веретенинской залежи) по [12] с авторскими изменениями: нижний протерозой: 1- оскольская серия курбакинская свита; курская серия: 2-7-коробковская свита: 2-верхняя железорудная подсвита – магнетитовые кварциты, 3-нижняя сланцевая подсвита – кварц-серицитовые и кварц-хлорит-серицитовые филлитовидные сланцы, 4-7-нижняя железорудная подсвита: 4-четвертая пачка – гематит-магнетитовые и магнетитовые кварциты, 5-третья пачка – гематит-магнетитовые (а) и гематитовые краснополосчатые (б) кварциты, 6-вторая пачка – магнетит-гематитовые кварциты, 7-первая пачка – карбонатно-магнетитовые и магнетитовые с карбонатом и малорудные кварциты; 8-стойленская свита, верхняя подсвита – углеродистые хлорит-серицит-кварцевые сланцы с прослоями песчаников; 9-контур распространения богатых железных руд; 10-разрывные нарушения; скважины и их номера.

В составе продуктивной коробковской свиты курской серии выделены [12] две железорудные и две сланцевые подсвиты. Нижняя железорудная подсвита на месторождении имеет значительно большее развитие по сравнению с верхней, полностью слагая Веретенинскую залежь. В основании нижней железорудной подсвиты залегают безрудные и малорудные кварциты мощностью 3-48 м. Выше по разрезу выделяются четыре пачки рудных кварцитов.

Первая пачка сложена карбонатно-магнетитовыми кварцитами мощностью 60-270 м. Среди них выделены карбонатно-магнетитовые и карбо-

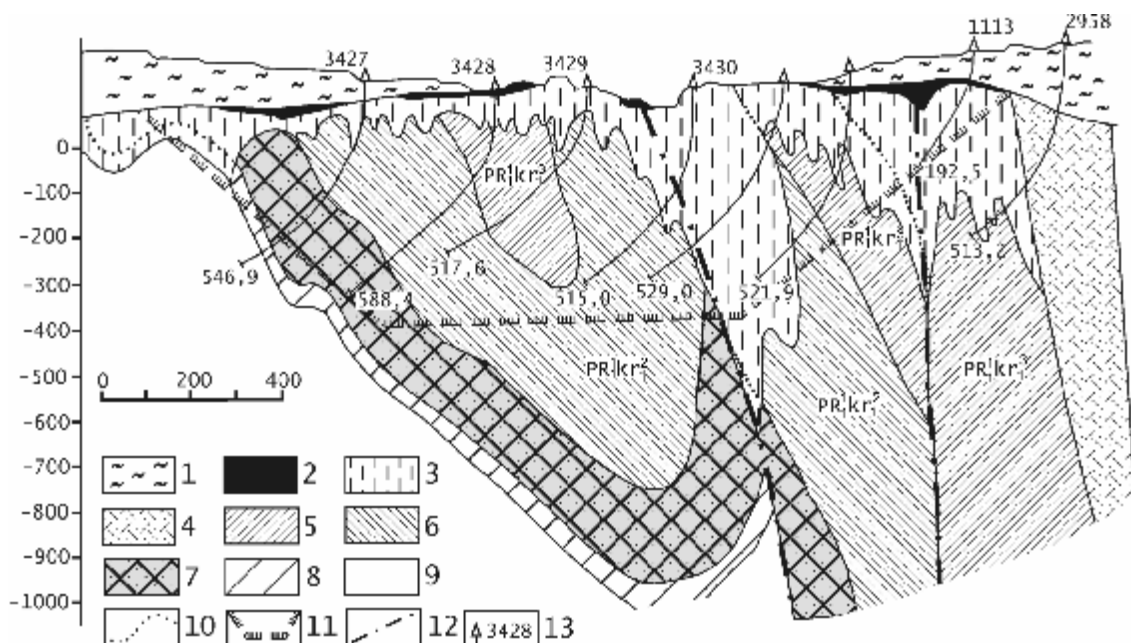


Рис. 3. Геологический разрез по РЛ 62 Михайловского месторождения (по материалам Юго-Западной ГРЭ ПГО «Центргеология» [12]): 1 – осадочные породы чехла; 2 – богатые железные руды; 3 – окисленные железистые кварциты; 4 – курбакинская свита (конгломераты, песчаники, кремнисто-серицитовые сланцы, риодациты); 5-8 – корбовковская свита (нижняя железорудная подсвита): 5-третья пачка – гематит-магнетитовые кварциты (PR^1, kr_1^3), 6-вторая пачка – магнетит-гематитовые гематит-магнетитовые кварциты (PR^1, kr_1^2), 7-первая пачка – карбонатно-магнетитовые и карбонатсодержащие магнетитовые кварциты (PR^1, kr_1^1), 8 – малорудные кварциты; 9 – стойленская свита, верхняя подсвита – черные углеродистые кварц-хлорит-серицитовые сланцы (PR^1, st_2); 10 – предполагаемые границы между типами железистых кварцитов в пределах зоны окисления; 11 – граница контура перспективного карьера; 12-разрывные нарушения; 13-скважины и их номера.

натсодержащие магнетитовые разности. Карбонатно-магнетитовые кварциты, залегающие обычно в нижней части подсвиты, содержат (в об. %): кварц (35-45), магнетит (25-35), карбонаты ряда сидерит-магнезит, преимущественно сидероплезит и пистомезит (15-20), иногда гематит (0-10), редкие зерна пирита, апатита и зеленой слюдки. Магнетитовые кварциты, преимущественно бессиликатные, приуроченные в основном к верхней части разреза, сложены кварцем (45-60%), магнетитом (30-45%), гематитом (до 10%) и карбонатами (до 10%). В незначительном количестве присутствуют хлорит, эгирин, щелочные амфиболы, биотит, пирит и апатит. Среднее содержание $Fe_{общ}$ составляет 36,1%, $Fe_{магн}$ – 25,7%.

Вторая пачка (мощностью 150-500 м) образована магнетит-гематитовыми кварцитами. В составе ее встречаются отдельные пласты существенно гематитовых кварцитов мощностью до 20-30 м, прослой гематит-магнетитовых, магнетитовых и биотит-магнетитовых пиритизированных кварцитов. Текстура кварцитов средне- и тонкополосчатая, обусловленная чередованием кварцевых, магнетитовых, гематитовых, зеленослюдковых, магнетит-кварцевых, гематит-кварцевых, гематит-магнетитовых, зеленослюдково-магнетитовых и зеленослюдково-кварцевых прослоек. Минеральный состав магнетит-гематитовых кварцитов (в об. %): кварц – 45-60, магнетит – 20-30, гематит – 15-25, зеленая слюдка – 10-25. Среднее содержание $Fe_{общ}$ 39,2%, $Fe_{магн}$ 20,8%.

Третья пачка характеризуется преобладанием гематит-магнетитовых кварцитов в центральной части Веретенинской залежи, где она имеет мощность 140-400 м. В ее восточном борту гематит-магнетитовые кварциты переходят в гематитовые. Для последних весьма характерна краснополосчатость, обусловленная присутствием дисперсного гематита в кварцевых прослойках. Минеральный состав (в об. %): кварц – 45-60, гематит – 35-45, в наибольших количествах встречается магнетит (до 8), пирит, карбонаты. Краснополосчатые (окисленные) железистые кварциты, широко развитые в восточном борту месторождения, нередко перекрываются образованиями оскольской серии.

Четвертая пачка состоит из переслаивающихся горизонтов магнетитовых и гематит-магнетитовых кварцитов общей мощностью 120-230 м. Здесь также встречаются прослой краснополосчатых кварцитов.

Верхняя железорудная подсвита развита на Остаповском (южном) участке, сложенной преимущественно магнетитовыми кварцитами, вверху и внизу разреза с гематитом, прослоями безрудных и малорудных кварцитов, кварц-хлоритовых сланцев. Основная Веретенинская залежь месторождения представляет собой переслаивание пластов железистых кварцитов мощностью от 10 до 300 м; гематит-магнетитовых (50% от суммарной мощности), магнетит-гематитовых и гематитовых (4,5%), силикатно-гематит-магнетитовых (25,5%), магнетитовых с карбонатом и карбонатно-магнетитовых (14%), си-

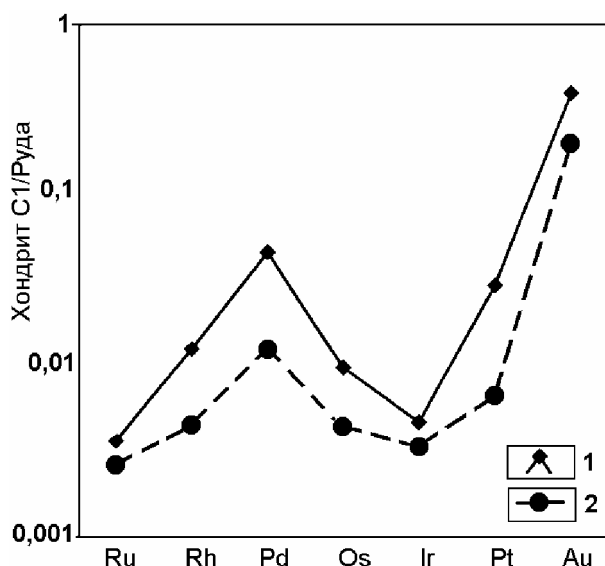


Рис.4. Нормализованные относительно хондрита С1 содержания благородных металлов в рудах Михайловского (1) и Оленегорского (2) месторождений.

Таблица 1
Концентрации Au, Pt и Pd в железистых кварцитах Михайловского месторождения

Номер образца	Золото (г/т) по данным ИСП	Химико-спектральный анализ (г/т)		
		Au	Pt	Pd
M-01	0.189	0.35	—	0.09
M-03	0.163	0.57	—	0.14
M-05	0.177	0.19	0.1	0.12
M-06	0.134	0.15	0.14	0.14
M-07	0.155	0.39	0.25	0.13
M-08	0.613	0.53	—	0.08
M-10	0.178	0.47	—	0.06

*) проба M-08 отобрана из жилы кварца, секущей железистые кварциты в северной части Михайловского карьера.

ликатно-магнетитовых (5%). Текстура кварцитов полосчатая, мелко- и тонкозернистая. Главными рудными минералами их являются магнетит и гематит (железная слюдка); второстепенными – мартит, гидроокислы железа, пирит; нерудные – кварц, силикаты, карбонаты.

Характерной особенностью железистых кварцитов Михайловского месторождения является более высокая их золотоносность по сравнению с аналогичными месторождениями России [1,20-24]. Сравнение средних содержаний благородных металлов, нормализованных к углестому хондриту, в железистых кварцитах Михайловского и Оленегорского месторождений показывает тождественность характеров распределений не только золота, но и платиноидов. Однако уровень концентрации благородных элементов в рудах Михайловского месторождения в несколько раз выше (рис.4).

В пределах Михайловского месторождения в метасоматически измененных гематит-магнетитовых и краснополосчатых (железослюдковых) кварцитах по материалам А.Н.Шелехова и др. [1,2] и до-

Таблица 2
Концентрации Au, Pt и Pd в кварцитах и кварцевых жилах Михайловского месторождения

Номер образца	Краткое описание	Химико-спектральный анализ (г/т)		
		Pt	Pd	Au
M-180	Кварцевая жила с сульфидами	0,03	0,009	-
M-183	Кварц из жилы	-	0,011	-
M-184	Кварцит с прожилками кварца	0,08	0,04	0,005
M-185	Гематитовый кварцит	0,02	0,015	0,005
M-189	Кварцит с прожилками кварца	0,03	0,03	0,005
M-190	Кварц из жилы	0,02	0,017	0,013
M-193	Кварцит с прожилками кварца	-	0,11	-
M-194	Кварцит с пиритом	0,04	0,022	-

полнительным аналитическим данным авторов (табл.1; [15]) оконтурены два ореола золота и палладия, первый протяженностью 57,5 м с содержанием золота более 0,01 г/т и средним содержанием палладия – 0,55 г/т. Второй – длиной 500 м при ширине 300 м (Au-0,1 г/т и Pd-0,2 г/т) приурочен к зонам пиритизации в интенсивно окисленных железистых кварцитах. В северной части ореола (рис.5) выделяются две неоконтуренные точечные аномалии золота с содержанием 4,17 и 0,9 г/т, приуроченные к жильно-прожилковым зонам кварца с адуляром и видимым золотом. Золотоносность и платиноносность разреза карьера Михайловского месторождения изучены недостаточно, преимущественно на данных шурфовых проб. Наиболее высокие содержания золота обнаружены в пробах краснополосчатых гематитовых кварцитов (до 5,5 т). Постоянное присутствие золота и ЭПГ отмечено в кварцевых жилах (табл.2; [15]).

В составе сульфидов из разных минеральных ассоциаций золото установлено [2] в пиритах из рудного щелочного метасоматита (5,11 г/т), слюдистого железистого кварцита (1,43 г/т) и кварцевой жилы (0,05 г/т); пирит из кварцевой жилы обогащен селеном (1556,3 г/т)*, а в пирите из щелочных метасоматитов установлены повышенные содержания ртути (117,9 г/т) и мышьяка (9709 г/т).

В пределах Михайловского железорудного района наиболее перспективной является Хальзеево-Михайловская палладисто-золоторудная зона [24], которая прослеживается непосредственно от карьера на север-северо-запад на протяжении 17 км при ши-

* Обогащение пирита селеном может свидетельствовать о высокой вероятности обнаружения в пределах «палладиевого» уступа Михайловского карьера самостоятельных минералов селенидов палладия, палладинита (оксида палладия) и порпецита (палладистого золота – PdAu). Эти минералы присутствуют в зоне окисления итабиритов и в контактах последних с якотингами в месторождениях Итабири и Маркес в Бразилии [25], а также месторождениях Рувбе и Шинколовбе в Заире [1].

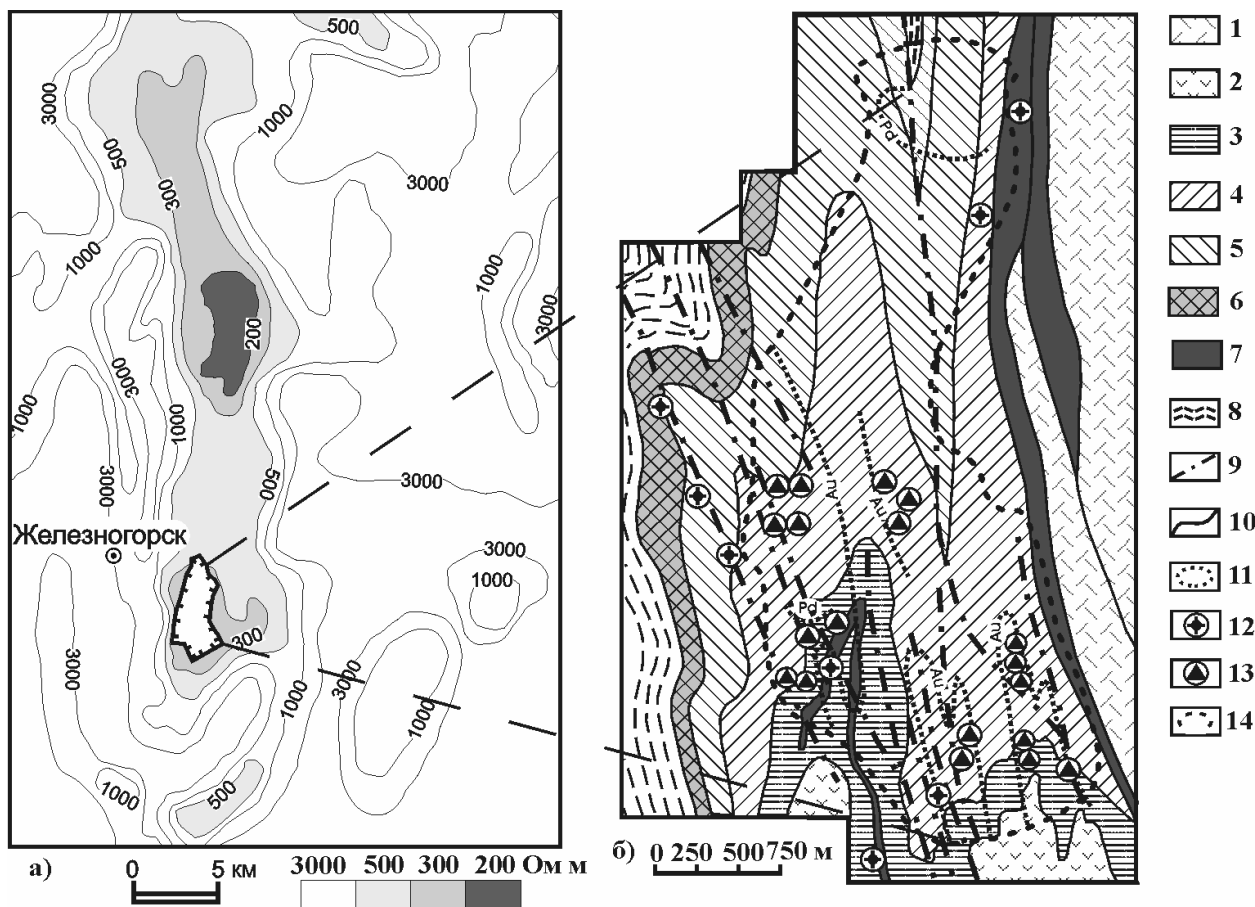


Рис. 5. а) Карта электросопротивления пород докембрия Железногорского района КМА; **б)** Геологическая карта Михайловского железорудного месторождения с данными о золото- и платинометальном оруденении (по Г.И.Кузьмину, с дополнениями): 1 - оскольская серия, курбакинская свита: песчанники, конгломераты, туфопесчанники, туфы, кварцевые порфиры (риодациты); 2-9 - курская серия, коробковская свита: 2 - верхняя железорудная подсвита (магнетитовые и малорудные кварциты), 3-6 - нижняя железорудная подсвита: 3 - четвертая пачка (магнетитовые и гематит-магнетитовые кварциты), 4 - третья пачка (гематит-магнетитовые и магнетит-гематитовые кварциты), 5 - вторая пачка (магнетит-гематитовые, кварциты), 6 - первая (нижняя) пачка (магнетитовые: карбонатно-магнетитовые и малорудные кварциты), 7 - железослюдковые (краснополчатые) кварциты, 8 - стойленская свита (углистые кварц-хлорит-серцитовые сланцы); 9 – разрывные нарушения; 10 - геологические границы; 11 - современные границы карьера по подошве осадочного чехла; 12 - контур внутрикарьерного склада некондиционных руд; 13 - минерализация золота в скважинах детальной разведки, (содержание 0,5-1,5 г/т); 14 - проявления золота по штуфным пробам в карьере, (содержание 1,0-4,17 г/т); 15 - первичные ореолы рассеяния золота (Au), палладия (Pd).

рине 800-1000 м и отчетливо трассируется электро-разведкой (низкоомные аномалии; см.рис.5а). Под острым углом она пересекает границу пород курской серии с плагиигранитами салтыковского комплекса, в которых размещаются жилы и прожилки кварц-сульфидного (пирит, халькопирит, галенит) благороднометалльного оруденения с содержанием золота от 0,11 г/т до 10 г/т.

В карьере месторождения выявлены 20 разномасштабных по мощности зон благороднометалльного оруденения двух типов: а) сульфидное золото-палладиевое и б) малосульфидное золото-кварцевое, которое контролируется согласными и субсогласными Хальзеево-Михайловской рудоносной структуры разрывными нарушениями (см.рис 5б).

Оруденение первого типа пространственно ограничено и отличается низкими концентрациями золота – 0,1-0,2 г/т и повышенными содержаниями

палладия (0,96 г/т). Золото-кварцевая минерализация характеризуется содержаниями золота от 1,0 до 7 г/т (отдельные пробы до 21 г/т). Подавляющая часть золота находится в свободном состоянии и имеет размеры менее 50 мкм, но встречаются зерна 0,1-1,0 мм. Прогнозные ресурсы золота в самостоятельных рудных телах в контуре карьера оцениваются величиной мелкого - среднего месторождения [2,26].

Анализ лабораторно-технологической пробы (составлена из 8 рядовых проб с параметрами 100 x 25 x 5 см и весом 25-30 кг каждая), отобранной в западном борту Михайловского карьера (рис.6), показал достаточно высокие концентрации ЭПГ и Au (табл.3).

Устойчиво высокие концентрации благородных металлов (Au=0,050-4,83 г/т; Pd=0,61-0,77 г/т; Pt=0,12-0,30 г/т; см.рис.6) установлены по результатам анализов штуфных проб, отобранных в горных

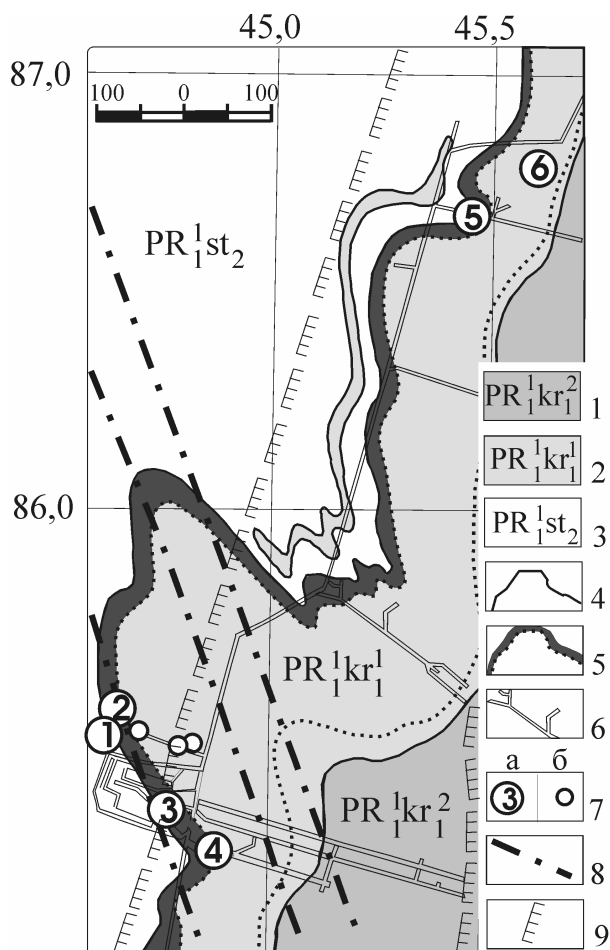


Рис. 6. Схематический план западного фланга Михайловского месторождения с результатами опробования горных выработок на благородно-металльное оруденение: 1- коробковская свита, нижняя железорудная подсвита, вторая пачка (магнетит-гематитовые кварциты); 2-коробковская свита, нижняя железорудная подсвита, первая пачка (карбонатно-магнетитовые, гематит-магнетитовые и малорудные кварциты); 3-стойленская свита, верхняя подсвита (черные углеродистые кварц-хлорит-серецитовые сланцы); 4- геологические границы; 5- а) зоны минерализации золота с содержаниями от 0,1г/т до 1,0 г/т, б) геологические границы карбонатно-магнетитовых кварцитов; 6- подземные горные выработки; 7-благороднометалльные проявления: а) –(в г/т): 1-(Au=0,84; Pd=0,77; Pt=0,13); 2-(Au=0,50; Pd=0,63; Pt=0,12); 3- (Au=2,87; Pd=0,58; Pt=0,30);4-(Au=4,83; Pd=0,60; Pt=0,21); 5-(Au=2,99; Pd=0,65); 6-(Au=0,86; Pd=0,61); б) - золота с содержанием не менее 0,5 г/т; 8-разрывные нарушения; 9-контур карьера на 01.01.01г.

Таблица 3
Содержание благородных металлов в лабораторно-технологической пробе из западного борта Михайловского карьера

№№ проб	Содержание, г/т		
	Au	Pd	Pt
1-2	0,034	0,520	0,214
3-4	1,390	0,250	0,046
5-6	не анализированы		
7-8	4,830	0,60	0,041

Примечание: приборно-атомно-абсорбционный метод. Лаборатория ЦНИГРИ.

выработках на различных участках той же достаточно протяженной (около 800 м при мощности 3-6 м) зоны (см.рис.6).

Особенности распределения золота и платиноидов в продуктах переработки железистых кварцитов Михайловского месторождения

Как отмечалось, с переработкой Михайловским ГОКом железных руд связано формирование в процессе обогащения огромной массы хвостоотвалов. Первичным источником благородных металлов, поступающих в промпродукты и хвостоотвалы, являются [2,14,26]: железистые кварциты, в том числе краснополосчатые железослюдковые; б) золотоносные зоны кварцевых, кварц-сульфидных жил и в) пирит-пирротиновые залежи в железистых кварцитах.

В конце семидесятых годов выполнены первые исследования золотоносности железных руд, продукции и хвостов обогащения Михайловского ГОКа [2]. Было установлено, что при содержаниях золота в железистых кварцитах до 0,1 г/т, в хвостах обогащения концентрация достигает 0,55 г/т. В самое последнее время по хвостам обогащения текущей добычи железистых кварцитов Михайловского ГОКа, содержащим 0,3-0,35 г/т золота, выполнены лабораторно-технологические исследования [21]. В результате опытов получен гравитационный концентрат с содержанием золота 14,0 г/т при извлечении 41,9% и выходе 1,1%. Содержание золота в промпродукте 2,5 г/т при извлечении 20,4% и выходе 3,0%. Все золото крупностью менее 50 мкм. В опытах с флотационным обогащением хвостов получен концентрат с содержанием золота 35,4 г/т при извлечении 50,6% и выходе 0,5%. В промпродукте содержание золота 2,2 г/т при извлечении 22,0% и выходе 3,5%. Более высокое содержание золота получено за счет извлечения ультратонкого золота. Превалирует свободное золото, сростки с сульфидами рудки.

На Михайловском ГОКе, из скважин, пробуренных в хвостохранилище, опробованы лежалые хвосты и хвосты «текущего дня». Полученные результаты (табл.4) подтвердили [15] помимо постоянного присутствия и примерно в тех же количественных соотношениях не только золота, но и платиноидов (Pt, Pd).

Результаты исследований хвостов обогащения на Лебединском ГОКе с использованием методики института «Механобр-Инжиниринг» при содержании золота в них 0,2 г/т в конечном продукте специального обогащения может достигать 200 г/т. В продуктах обогащения (концентраты и хвосты) технологических проб Михайловского месторождения также установлено содержание золота до 0,12 – 0,3 г/т. По расчетам [17,18] здесь можно получать промышленный продукт с содержанием золота до 15-20 г/т при извлечении 50% в процессе гравитаци-

Таблица 4

Предварительные результаты о распределении некоторых платиноидов и золота в хвостах обогащения железистых кварцитов Михайловского месторождения [15]

Место отбора проб	Индекс проб	Содержание (в г/т)		
		Pt	Pd	Au
Михайловский ГОК (хвостохранилище)	4 м + 8 м	0.02	0.05	< 0.02
	7 м + 16 м	< 0.02	< 0.05	< 0.02
	6 м + 10 м	< 0.02	< 0.05	< 0.02
	2 м + 12 м + 14 м	< 0.02	< 0.05	0.05

Примечание. Анализы выполнены пробирно-атомно-абсорбционным методом в ЗАО "Механобр-Аналит" (аналитик Л.А.Ушинская).

Таблица 5

Результаты гравитационного извлечения золота из продуктов переработки железистых кварцитов Михайловского месторождения

Исходные технологические продукты	Содержание Au, г/т	Гравитационный концентрат		
		Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Пески гидроциклона	0,094	0,1	43,5	46,3
Пески классификатора	0,112	0,4	9,7	34,6
Хвосты фабрики	0,042	0,3	0,4	2,8
Хвосты фабрики	0,057	0,66	3,1	3,6

Таблица 6

Содержания благородных металлов в рудах и технологических продуктах Михайловского месторождения

Типы руд и технологические продукты	Содержания, мг/т							
	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au	Ag, г/т
Аглоруда	<5	<20	25	<10	<5	30	60	<2
Убого минерализованные окисленные кварциты			<20			<50	50	<2
Гравитационный концентрат из убого минерализованных окисленных кварцитов			<20			<50	50	<2
Гравитационный концентрат из песков классификатора			80			120	7300	
Гравитационный концентрат из песков гидроциклонов	20	80	520	50	100	700	30000	
Гравитационный концентрат из отвальных хвостов обогащения			<20			<50	500	
Отвальные хвосты обогащения			22			15	42	<2
Мономинеральная фракция пирита			20			15	3500	6
Магнетитовый концентрат			<20			<10	22	<2

онного обогащения. Платина и палладий на 40-50% сконцентрированы в гравитационном концентрате. Содержания этих металлов в магнитных продуктах близки к 0,05-0,09 г/т. Отмечается некоторая обогащенность платиной магнитного продукта, а слабомагнитного – палладием. В немагнитной фракции содержание платиноидов увеличивается до 0,6 г/т (Pt+Pd). По-видимому, основная часть платиноидов рассеяна в виде эмульсионной вкрапленности в силикатах и магнетите.

Одним из наиболее широко используемых аппаратов для гравитационного извлечения тонкого и мелкого самородного золота в последние годы стал концентратор Knelson. Результаты исследований по обогащению проб концентратов, хвостов и продуктов циклов измельчения железных руд на Михайловском ГОКе по схеме, включающей концентратор "Knelson 3,5» с получением хвостов и гравитационного концентрата с перечищением последнего магнитной сепарацией в слабом (80 кА/м) и сильном 400 кА/м полях, приведены в таблице № 5. Установлено, что наиболее эффективно обогащаются пески гидроциклона, где содержание золота в черновом концентрате составило 43,5 г/т при извлечении соответственно 46,3% и высокой степени его концентрации.

Содержания благородных металлов в рудах и технологических продуктах Михайловского ГОКа приведены в таблице № 6.

Некоторые исследователи [27] считают, что на Михайловском ГОКе ежегодно выносятся около 4 т золота и значительные количества платиноидов [15], т.е. за 20 лет хвостохранилище стало крупным техногенным объектом.

Формы нахождения благородных металлов в железистых кварцитах Михайловского месторождения

Среди благородных металлов, являющихся важнейшим компонентом железистых кварцитов, количественно преобладающее золото находится преимущественно в самородном состоянии, а также в виде сплавов [28,29,2].

Сведения о наличии собственных минеральных фаз ЭПГ в железистых кварцитах крайне ограничены. Достоверно установлены самородный палладий, палладистое золото (Pd от 1 до 50%), а так же арсенид-антимониды и селениды палладия (палладсеит – Pd₁₇Se₁₅, арсенопалладинит – Pd₅(As,Sb)₂, атенеит – (Pd,Hg)₃As, изометриит – PdAsSb, стибнопалладинит – Pd₅Sb₃) в золоторудном месторожде-

Таблица 7

Классификация золотин из пробы текущих хвостов Михайловского ГОКа

Классы крупности золота, мм	Вес классов, мг	Число выделений золотин, шт	Средний вес единичной золотины, мг	Пробность золотин / количество измерений
-0,5+0,2	0,75	6	0,125	770 / 4
-0,2+0,14	0,84	27	0,031	830 / 21
-0,14+0,075	6,44	524	0,0123	821 / 29
-0,075+0,040	7,59	380	0,008	815 / 22
-0,040	0,60	46	0,001	812 / 12
Итого	16,22			

Таблица 8

Результаты гравитационного обогащения кварцитов (проба 9/8) Михайловского месторождения

Наименование продуктов	Масса, г	Выход, %	Содержание, г/т		
			Au	Pt	Pd
Гравитационный концентрат	36,72	0,118	10	6,5	3,3
Хвосты обогащения	30963	99,882	<0,05	<0,02	<0,02
Исходная проба*	31000	100	>0,012	>0,008	>0,004

Примечание: * - содержание в исходной пробе рассчитано исходя из концентрации металлов в концентрате.

нии Итабира (Бразилия), связанном с железисто-кремнистой формацией, а так же соединения состава PdAg (Pd=49,28-49,70%; Ag=49,19-49,43%; Cu=0,09-0,13%) в гипергенных железных рудах [30,31,25,32]. Единичные зерна (до 50 мкм) существенно осмиевого состава – рутениридосмин (мас. %: Os=64,4; Ir=18,3; Ru=10,5; Rh=2,0; Pt=2,0; Pd <0,5; Fe=1,3; Ni=0,8) установлены в немагнитной фракции гравитационного концентрата Оленегорского месторождения (Кольский полуостров).

Выполненные авторами специальные исследования железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (КМА) позволили существенно расширить сведения о минералогии ЭПГ и Au.

При изучении технологической пробы (табл.7; [2]) текущих хвостов Михайловского ГОКа весом 200 кг гравитационными методами выделено более 800 зерен (16,22 мг) свободного самородного золота крупностью от +0,2 мм до -0,040 мм.

Большая часть выделений золота представлена объемно комковатыми, уплощенно-лепешковидными зернами, преимущественно удлиненными в плане до соотношения 1:2. Край большинства золотин криволинейные, слегка зазубренные. Поверхность золотин преимущественно мелкоячеистая и шагреновая. Цвет хорошо отпрепарированных золотин яркий и золотисто-желтый; у загрязненных с поверхности золотин грязно-желтый с зеленоватым оттенком и соломенно-желтый. Пробность золота меняется в небольших пределах. В единичных зернах отмечаются примеси Cu, Hg, Se, As.

Описанное золото относится к классу мелко- и тонкого, извлечение которого возможно с помощью отсадочных машин, центробежных сепараторов и концентрированных столов.

Объектом исследования форм нахождения благородных металлов (прежде всего ЭПГ) являлись железистые кварциты одного из участков западного фланга Михайловского месторождения (см.рис.6), где по результатам специального опробования были установлены повышенные содержания Au=0,20-4,83

г/т; Pd =0,250-0,600 г/т; Pt=0,041-0,214 г/т (см. табл.3). Отобранная на этом же участке лабораторная минералого-технологическая проба №Т-9, весом 200 кг включала 8 частных бороздовых проб (800x25x5 см), каждая из которых сокращалась на делителе Джонса в восемь раз с последующим объединением одной восьмой каждой пробы в среднюю для последующего пробирного анализа и гравитационной сепарации на концентрационном столе СКЛ-2. Навеска для пробирного анализа измельчена на чашковом истирателе целиком. Пробирная плавка проводилась из двух параллельных определений на навесках 40 г каждая. По результатам аналитических исследований, выполненных в лаборатории ЗАО «Механобр-Инжиниринг» (Санкт-Петербург) содержание благородных металлов (Au=0,12 г/т; Pd <0,02 г/т; Pt<0,02 г/т) оказалось значительно ниже тех значений, которые были получены в ЦНИГРИ. Лишь в гравитационном концентрате окисленных малорудных железистых кварцитов из последней секции бороздовой пробы (9/8) содержание благородных металлов составило Au=0,22 г/т; Pd =0,04 г/т; Pt=0,05 г/т.

Для определения форм нахождения благородных металлов проведено исследование укрупненной навески указанной частной пробы (9/8) массой 31 кг. Данная навеска измельчена до крупности менее 0,25 мм, после чего проведено ее концентрирование на центробежном сепараторе «Knelson 3,5» с контрольным обогащением на центробежном сепараторе ЦВК-100М. В результате получен гравитационный концентрат, который послужил основой для выделения минералов благородных металлов (табл.8).

Половина полученного гравитационного продукта пошла на определение содержания благородных металлов пробирным анализом. Вторая половина перечищена в чашках с использованием тяжелой жидкости М-45 (плотность 2,82 г/см³) с получением «ультратяжелой фракции». Легкая фракция доводки растворена в плавиковой кислоте с магнитной сепарацией.

Химический состав минералов платиновой группы и золота в железистых кварцитах Михайловского месторождения

Минералы платиновой группы							
Элементы	Содержание, мас.%						
	1	2	3	4			
Fe	0,2	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.			
Ni	1,2	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.			
Cu	0,8	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.			
Ru	26,6	3,3	35,2	19,8			
Rh	0,3	0,3	0,7	н.п.о.			
Pd	0,2	0,3	н.п.о.	н.п.о.			
Os	56,5	95,6	25,1	19,8			
Ir	12,9	0,5	28,1	20,0			
Pt	1,3	н.п.о.	10,9	40,4			
Самородное золото							
Элементы	Содержание, мас.%						
	1	2	3	4	5	6	7
Cu	0,7	0,3	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Ag	н.п.о.	0,3	1,1	1,0	2,7	1,5	9,6
Pd	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,7
Au	99,3	99,4	98,9	99,0	97,3	98,5	89,7

Примечание: Минералы платиновой группы: 1-рутениридосмин; 2-осмий самородный; 3- платиносодержащий рутениридосмин; 4-платосмиридий. Анализы выполнены в ЗАО «РАЦ Механобр Инжиниринг Аналит», CamScan-4, с детектором LINK-10000, аналитик Ю.Л.Крецер, данные анализа нормализованы; н.п.о. – ниже предела обнаружения.

рацией 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. Масса полученного продукта составила 10 мг, что соответствует примерно одной трехмиллионной части исходной пробы. Весь материал этого продукта пошел на изготовление препарата для электронномикроскопических исследований, в результате которых установлены сперрилит, осмий самородный, рутениридосмин, платиносодержащий рутениридосмин, платосмиридий, золото самородное (табл.9).

Сперрилит ($PtAs_2$) слагает мелкие (рис.7 а) оскольчатые зерна (5-20 мкм). Обнаружено 4 зерна минерала, химический состав которых одинаков и полностью соответствует стехиометрическому. **Рутениридосмин** ($Os_{0,44}Ru_{0,39}Ir_{0,1}Ni_{0,03}Cu_{0,02}Pt_{0,01}$) установлен в виде мелких (10 мкм) зерен (рис.7 б); Единичные зерна (рис.7 в) **осмия самородного** ($Os_{0,92}Ru_{0,06}$) незначительно обогащены $Ru=3,3$ мас.%, $Rh=0,3$ мас.%, $Pd=0,3$ мас.%, $Ir=0,5$ мас.%. **Платиносодержащий рутениридосмин** ($Ru_{0,5}Ir_{0,21}Os_{0,19}Pt_{0,08}Rh_{0,01}$) установлен в единичном зерне (рис.7 г). Одно сравнительно крупное выделение (рис.7 д) и несколько мельчайших зерен представлены **платосмиридием** ($Pt_{0,34}Ru_{0,32}Os_{0,17}Ir_{0,17}$). Золото самородное, которое обнаружено в восьми зернах размером от нескольких микрон до 40-50 мкм, характеризуется высокой пробностью – 993 (лигатура – медь; рис.7 е); 989 (лигатура – серебро; рис.7 ж); 897 (лигатура – серебро, примесь палладия – 0,4 мас.%)

Микрозондовыми исследованиями минералы палладия не выявлены, вероятно, вследствие присутствующей им повышенной хрупкости, их неизбежного переизмельчения при дезинтеграции и невозможности в этих условиях извлечения в гравитационные концентраты при доводке. Часть палладия находится в виде примеси в самородном золоте (см.табл.9).

Повышенные концентрации благородных металлов в сульфидизированных железистых кварцитах и их окисленных разновидностях [9,15,24,34,35], а также в гематитизированных рудах [5,9,24,36] выступают в качестве важнейшей предпосылки нахождения в них новых минеральных фаз золота и платиноидов. Широкое развитие и повышенные концентрации не только золота, но и платиноидов в богатых железных рудах кор выветривания, в самих железистых кварцитах, кварцевых, кварц-сульфидных и сульфидных (пирит-пирротиновых) зонах и метасоматитах, а так же в гигантских по масштабам хвостоотвалах трех действующих ГОКов КМА определяют в совокупности наличие в Центральной России нового, нетрадиционного уникального по ресурсам источника благородных металлов, образующих ряд собственных минеральных фаз (сперрилит, рутениридосмин, платиносодержащий рутениридосмин, осмий самородный, платосмиридий, высокое пробное самородное золото).

Новые данные о закономерностях распределения и формах нахождения ЭПГ и Au позволяют использовать выбор реальных технологий обогащения железных руд с попутным извлечением благородных металлов [16,1] в действующих ГОКах Центральной России.

Авторы благодарны профессору В.М.Изоитко (Санкт-Петербург) и ведущему геологу ОАО Михайловского ГОКа П.З. Завьялову, оказавшим содей-

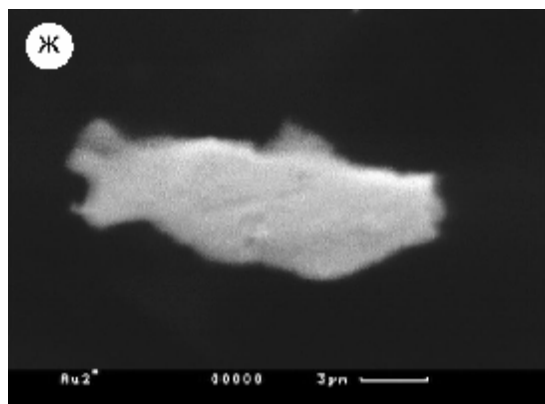
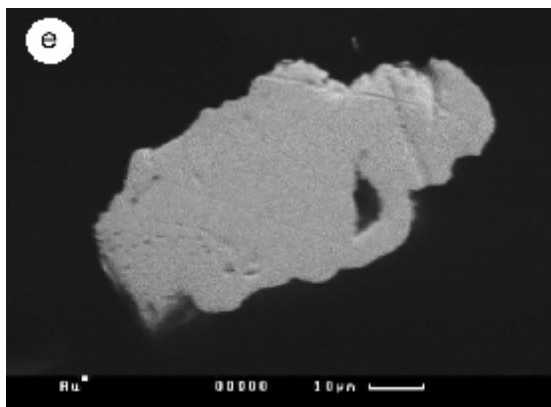
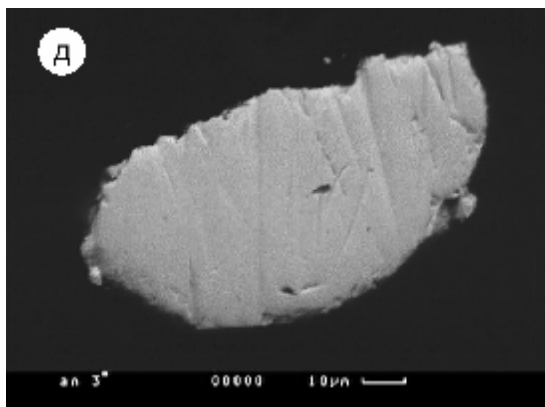
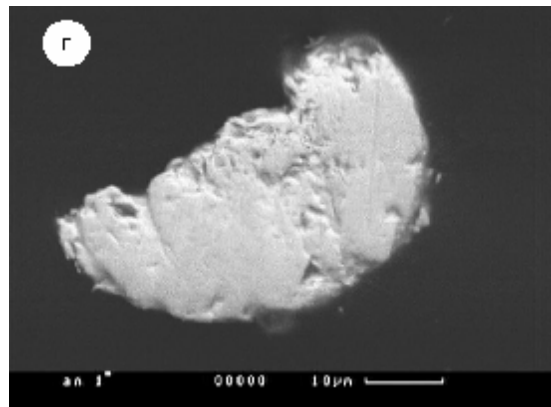
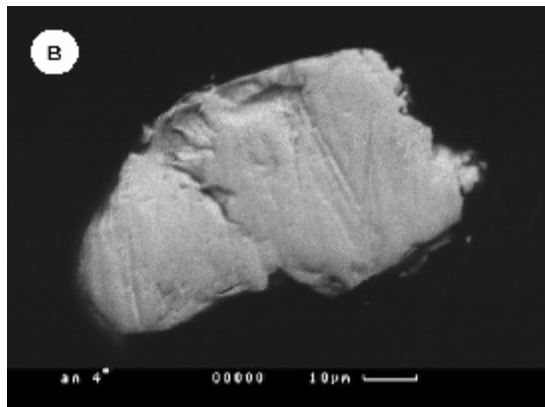
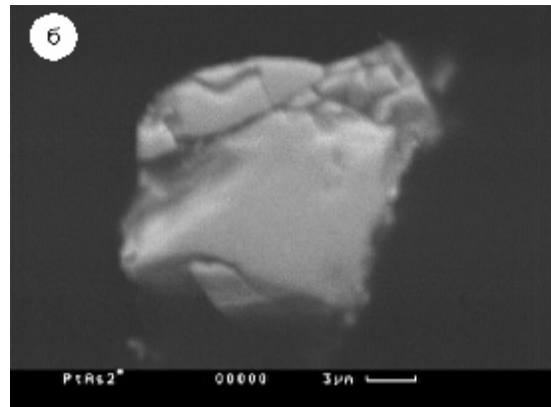
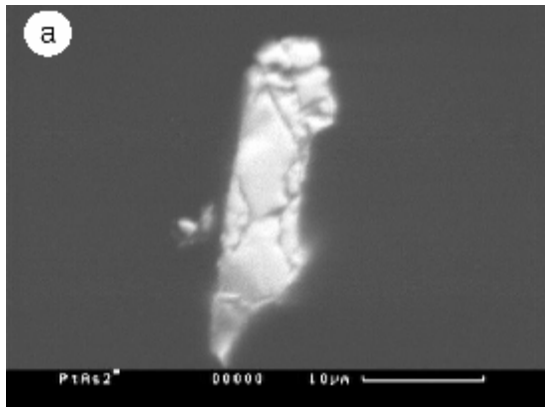


Рис.7. Формы выделения минералов ЭПГ и Au из железистых кварцитов Михайловского месторождения: а - сперрит; б-рутениридосмин*; в - осмий самородный; г - платиносодержащий рутениридосмин; д - платосмиридий; е-ж - золото самородное. Примечание: * - Названия минералов ЭПГ даны по справочнику [33].

ствие в отборе лабораторно-технологической пробы и выполнении аналитических исследований, а так же заместителю директора ОАО «Хорс», к.г.-м.н В.А.Лючкину в представлении геологического материала.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования РФ, грант № E02-9.0-54.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренков В.Г., Таловина И.В. Геохимия элементов платиновой группы. -С.Пб., 2001. -226 с.
2. Шелехов А.Н., Лючкин В.А., Ляховкин Ю.С. Месторождения железистых кварцитов и продукты их передела – новый перспективный источник золото-платиносодержащего сырья в XXI в. (на примере Центральной России) // Платина России т. III в двух книгах. - М., 1999. -С.289-294.
3. Шер С.Д. Металлогения золота (Северная Америка, Австралия и Океания).- М., 1972. -295 с.
4. Шер С.Д. Металлогения золота (Евразия, Африка, Южная Америка).- М., 1974. -256 с.
5. Двойнин В.В., Дунай Е.И., Воевода И.И. Золотоносность железистых кварцитов курской серии КМА // Разведка и охрана недр.- 1993.- №9. -С.12-14.
6. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Яцкевич Б.А., Глухоедов Н.В. Состояние и проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов России (Результаты и направление исследований по программе "Платина России") // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. - М., 1995. - Т. 2, кн. 1. - С. 7-48.
7. Чернышов Н.М., Кононов Н.Д., Молотков С.П. Перспективы рудоносности докембрийских зон растяжения на Воронежском кристаллическом массиве // Изв. вузов. Геол. и разведка. -1992. -№1. -С.84-89.
8. Чернышов Н.М. Формационно-генетические типы платинометалльных проявлений Воронежского кристаллического массива // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов.- М., 1994. -С.85-103.
9. Чернышов Н.М., Молотков С.П. Минерагенические критерии золото-платинометалльного рудообразования эндогенного и техногенного типов в эксплуатируемых месторождениях железных руд КМА // Матер. 3-го Международного семинара "Новые идеи и концепции минералогии". - Сыктывкар, 2002. -С.124-125.
10. Тимошенко А.С., Быкова Л.Н., Царев В.В. Минералого-технологическая оценка обогатимости техногенного сырья Михайловского ГОКа // Геологическое изучение и использование недр. - М., 1999.-№5. -С.63-66.
11. Чернышов Н.М. Металлогеническое районирование Воронежского кристаллического массива в связи с его никеленосностью // Геология рудных месторождений. -1990. -№3. -С.3-16.
12. Голивкин Н.И., Кононов Н.Д., Орлов В.П. и др. Железные руды КМА (под редакцией Орлова В.П., Шевырева И.А., Соколова Н.А.).- М., 2001. -616с.
13. Щеголев И.Н. Железорудные формации докембрия Курской магнитной аномалии и Украинского щита // Геол. журн.- 1981.- Т.41, №5. -С.41-49.
14. Чернышов Н.М., Додин Д.А. Формационно-генетическая типизация платинометалльных месторождений и проявлений для целей прогноза // Докл РАН. -1994. -Т.331. -№4. -С.265-284.
15. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Чередникова О.И. Металлогения платиноидов крупных регионов России. - М., 2001. -302 с.
16. Додин Д.А., Оганесян Л.В., Чернышов Н.М., Яцкевич Б.А. Минерально-сырьевой потенциал платиновых металлов России на пороге XXI века. Под. ред. В.П. Орлова.- М., 1998. -121с.
17. Мызников И.К., Шелехов А.Н. Некоторые минералого-геохимические особенности распространения золота на Михайловском железорудном месторождении // Проблема комплексного использования руд. 2-й Межд. симп.: Тез. докл.- СПб, 1996. -С.37.
18. Мызников И.К., Шелехов А.Н. Технологическая оценка отвальных хвостов магнитной сепарации железистых кварцитов КМА для организации попутной золотодобычи // Проблема комплексного использования руд. 2-й Межд. симп.: Тез. докл. – СПб, 1996. -С. 76.
19. Петров С.В., Сентемова В.А. благородные металлы в железистых кварцитах и возможность их извлечения // Обогащение руд. -1998. -№6. -С.36-40.
20. Ильин К.Г., Лазаренков В.Г., Сенбек С.В. и др. // Геологический атлас России 1995-1996, масштаб 1:10 000 000. Разд.3. Полезные ископаемые и закономерности размещения. Карта месторождений золота и платины России (N-36-I, M-37-I). – М.-СПб, 1996. -С.121-145.
21. Кушнеренко В.К., Шувалов Ю.М., Мятлин В.М. Золото и другие элементы в железорудных месторождениях КМА (к проблеме комплексного использования) // Региональная геология и металлогения. -1999. -№9. -С.120-124.
22. Рожков И.С., Писемский Г.В., Ганжа Л.М. и др. О золотоносности железных руд Кривого рога // ДАН СССР. -1971. -Т.196, №44. -С.923-926.
23. Усенко И.С., Кравченко Г.Л., Сахацкий И.И. О металлогенической специализации железистых кварцитов Приазовья // Матер. второго Петрографического совещания по Европейской части СССР. - Воронеж, 1972. -С.33-135.
24. Лючкин В.А., Казанцев В.А. Предпосылки промышленных месторождений золота на территории Курской магнитной аномалии // Вестн. Воронеж. ун-та. - Сер. геол. -1997. - №3. - С.95-99.
25. Olivo G.R., Gaunter M., Bardoux M. Palladium gold from Caue iron mine. Itabiro District, Minas Gerais, Brasil. // Miner. Mag. – 1994.-Vol.58, №4. -P.579-587.
26. Чернышов Н.М. Минерально-сырьевой потенциал цветных и благородных металлов Центрально-Черноземного региона: Состояние и перспективы освоения // Стратегия социально-экономического развития регионов: Сб. статей науч.-практ. конф.- Воронеж, 2002. -С.38-46.
27. Тигунов Л.П., Быховский Л.З. Проблемы и перспективы попутного получения благородных металлов из нетрадиционных источников минерального сырья // Геология, генезис и вопросы освоения комплексных месторождений благородных металлов: Матер. Всероссийского симпозиума. - М., 2002. -С.381-384.
28. Дьяченко А.П., Легедза В.Я., Шелехов А.Н. О золотоносности горных пород докембрийского фундамента Старооскольского района Курской магнитной аномалии // Докл. АН СССР. -1970.- Т.193, №2.-С.415-417.
29. Лазаренков В.Г., Петров С.В., Таловина И.В. Месторождения платиновых металлов – СПб, 2002. – 298 с.
30. Осовецкий Б.М. Типохимизм шлиховых минералов. Справочник. – Пермь, 2001. -244 с.
31. Юшко-Захарова О.Е. Платиноносность рудных месторождений. -М., 1975. -248 с.

32. Zang W., Fyfe W.S., Barnet R.L. A silver-palladium alloy from the Bahia lateritic gold deposit, Carajas, Brazil // *Miner. Mag.* – 1992.-Vol.56, №1 .-P.47-51.
33. Минералы благородных металлов: Справочник / О.Е.Юшко-Захарова, В.В.Иванов, Л.Н.Соболева и др. – М., 1986. -272 с.
34. Жмакин В.М. Прогнозирование и методы поисков оруденения в зеленокаменных образованиях // Прогнозирование и поиски рудных месторождений на Воронежском кристаллическом массиве. - М., 1992. - С.71-78.
35. Кашин С.В., Плющев Е.В., Попкова Н.В. Стадийность и зональность эпигенетического минералообразования в железистых кварцитах Михайловского месторождения (КМА) // *Зап. ВМО.* -2001. -№6. -С.95-98.
36. Горяшин В.И. Некоторые закономерности размещения эндогенной минерализации в Старооскольском рудном узле на основе геодинамического анализа тектоники раннедокембрийских образований // Матер. международной конференции “Проблемы геодинамики и минерагении Восточно-Европейской платформы”. - Воронеж, 2002. -С.132-135.

