

УДК 553.493+553.465+661.865

DOI: 10.15372/KhUR20180206

Состав и структурные особенности редкометалльных руд Чуктуконского месторождения

В. И. КУЗЬМИН, Н. В. ГУДКОВА, Д. В. КУЗЬМИН, А. М. ЖИЖАЕВ, Г. Н. БОНДАРЕНКО, М. А. МУЛАГАЛЕЕВА, А. С. РОМАНЧЕНКО

Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН,
Красноярск, Россия

E-mail: kuzmin@icct.ru

(Поступила 27.11.17; после доработки 02.03.18)

Аннотация

Исследованы редкометалльные руды Чуктуконского месторождения (Красноярский край). Установлено, что руды комплексные, преимущественно железомарганцевого состава (содержание оксидов железа 50 % и более), с высоким содержанием лантаноидов, иттрия, ниобия, ванадия, цинка и фосфора. Основные минеральные формы редкоземельных металлов – монацит и флоренсит, ниобия – стронций-бариевый пирохлор. Изучение гранулометрического состава показало, что свыше 50 % массы руды представлено классом крупности частиц преимущественно 1–2 мкм и ~12 мкм. Как правило, элементы практически равномерно распределяются по всем классам крупности. Согласно результатам микроскопических исследований, руда в основном образована ультрадисперсными частицами микрометрового (первые микрометры) размера, которые, в свою очередь, представляют собой сростки наноразмерных частиц. Полученные данные объясняют сложность выделения концентратов редкоземельных металлов и ниобия из руды с использованием обогащательных методов.

Ключевые слова: Чуктуконское месторождение, редкометалльные руды, редкоземельные металлы, ниобий

ВВЕДЕНИЕ

По содержанию ценных металлов и их запасам Чуктуконское месторождение ниобий-редкометалльных руд является одним из важнейших объектов для модернизации редкометалльной промышленности России [1–3]. Месторождение расположено в 110 км к северу от недавно запущенной Богучанской гидроэлектростанции (Богучанский район Красноярского края), приурочено к одноименному куполу Чадобецкого поднятия Сибирской платформы и принадлежит к рудноформационному типу редкометалльных кор выветривания карбонатитов, ассоциирующих с малыми телами щелочных ультраосновных пород. Тип руд – тонкодисперсные пирохлор-монацитовые руды в латеритных корах выветривания. Площадь коры выветривания по кар-

бонатитам сравнительно небольшая и составляет примерно 16 км², мощность ее достигает 300 м, закономерно увеличиваясь к сводовой части купольной структуры. Нижняя и верхняя границы коры выветривания неровные.

В 2007 г. Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых России утверждены запасы балансовых редкоземельных руд по категории С₂ в количестве 6.6 млн т, при среднем содержании Nb₂O₅ 0.60 %, оксидов редкоземельных металлов (РЗО) 7.32 %, MnO₂ 15.5 %, Fe_{общ} 34.3 %. Прогнозные ресурсы руд как минимум на порядок превышают утвержденные запасы; ожидается, что уже к 2020 г. они вырастут до 33.7 млн т при содержании РЗО 6.14 % [4]. В 2015–2017 гг. компания ООО “Росгеология” продолжила работы по доизучению Чуктуконского месторождения. Их завершение позволит в скором времени начать

практическое освоение этого уникального рудного объекта России.

Как показали выполненные ранее исследования [4–10], основная проблема переработки чукотконских руд связана с невозможностью их обогащения традиционными методами, что, на наш взгляд, обусловлено тонкодисперсностью руды и тесной срощенностью ее минеральных частиц. Вместе с тем в настоящее время развиваются и появляются новые методы обогащения и разделения таких руд, в частности, с использованием центробежных аппаратов.

В этой связи актуально изучение особенностей состава и структуры чукотконских руд, а также оценка принципиальной возможности их обогащения в случае появления новых методов разделения ультрадисперсных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использованы минеральные кислоты (соляная и азотная) и гидроксид натрия квалификации “х. ч.”. Исходная технологическая проба руды (ТП-6) составлена из дубликатов керновых проб скважин и из проб мелкометражных скважин (1999 г., КНИИГИМС, В. Г. Ломаев). В табл. 1 приведен химический состав усредненной пробы чукотконской руды; перед проведением анализа образец высушивали при температуре 105–110 °С.

Распределение по размерам частиц крупностью менее 40 мкм изучено с использова-

нием лазерного дифракционного анализатора частиц LA-300 (Horiba). Размеры частиц определены также методом спектроскопии динамического рассеяния света одновременно с измерением дзета-потенциала с помощью прибора Zetasizer Nano ZS. Дисперсный состав руды определялся в водных и слабощелочных (рН ~ 8) суспензиях.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием сканирующих электронных микроскопов S-5500 (Hitachi) во вторичных электронах и ТМ-3000 (Hitachi) в обратноотраженных со встроенными энергодисперсионными спектрометрами для микрорентгеноспектрального анализа. Для определения состава основных морфологических типов частиц проведено элементное картирование изображений с использованием энергодисперсионного спектрометра Noran NSS-7 (ThermoFisher Scientific, США), интегрированного в сканирующий электронный микроскоп ТМ-3000 (Hitachi).

Регистрацию рентгеновских дифрактограмм проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (“Буревестник”, Россия) в диапазоне углов $2\theta = 5\text{--}70^\circ$.

Состав твердых продуктов определен с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора (PANalytical Axios Advanced).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав руды

Руды являются комплексными, преимущественно железомарганцевого типа, содержание Fe_2O_3 в пределах месторождения варьирует от 38.0 до 71.4 %, MnO – от 1.2 до 19.7 %; концентрации бария 0.6–14.5 % (в пересчете на BaO), P_2O_5 1.2–27.0 %, Nb_2O_5 0.2–4.85 %, лантаноидов 1.8–30.4 %, Y 0.7–2.3 %, Sc 0.005–0.05 %, Mo до 0.1 %, V 0.1–0.4 % (V_2O_5), Zn 0.2–1.5 %. Руды слабо радиоактивны из-за наличия в небольших количествах урана и тория.

Материал малых проб представлен повсеместно темноокрашенными охрами и малоглинистыми сыпучками с градацией цветов от почти черного до зеленовато-серого с преобладанием темных окрасок, что соответствует высокому содержанию оксидов железа в форме Fe_2O_3 (30–50 %) и оксидов марганца (до

ТАБЛИЦА 1

Состав пробы исходной чукотконской руды

Оксид	Содержание, мас. %
Al_2O_3	4.60
BaO	1.70
CaO	1.00
Fe_2O_3	61.00
$\Sigma\text{Ln}_2\text{O}_3$	7.10
MgO	0.14
MnO_2	11.00
Nb_2O_5	1.30
P_2O_5	3.80
PbO	0.06
SO_3	0.38
SiO_2	4.50

10 %). Образцы желтоватых и светло-коричневых оттенков оказались также высокожелезистыми (30–40 % Fe_2O_3).

По данным рентгенофазового анализа, основные компоненты представительной пробы руды: оксиды железа гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и гетит $\text{FeO}(\text{OH})$, $\text{FeO}_{1.833}(\text{OH})_{0.5}\text{O}_{2.5}$, минералы марганца псиломелан, пиролюзит $\text{Ba}_x\text{Mn}_2\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MnO_2 , $(\text{Fe}_{0.67}\text{Mn}_{0.33})\text{O}(\text{OH})$, фосфаты РЗМ монацит LnPO_4 и флоренсит $\text{LnAl}_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_6$, апатит. Наряду с основными минералами обнаружены минералы ниобия пироксид $(\text{CaNa})_2(\text{Nb,Ti})_2\text{O}_6\text{F}$ и в небольших количествах гидроксифосфат железа гиниит $\text{Fe}_5(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и сидерит FeCO_3 , доля которого не превышает 3 % (установлено по количеству выделившегося углекислого газа при кислотном разложении руды).

Прокалка образца до температур 1200 °С сопровождается убылью массы приблизительно на 11 %. Первый диапазон снижения массы (до 6 %) приурочен к интервалу температур 200–250 °С. Процесс сопровождается эндотермическим эффектом и, по-видимому, обусловлен переходом $\alpha\text{-FeOOH}$ в $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, который наблюдается при 243 °С. Непрерывная потеря массы в ходе дальнейшего повышения температуры до 1100–1200 °С, возможно, связана с разложением карбонатов, а также с дегидратацией гидроксидных форм минералов (гетит, флоренсит, другие алюмофосфаты) и разложением высших оксидов марганца (MnO_2 , Mn_2O_3).

Особенности гранулометрического состава чукутконской руды

Руда более чем на 50 % представлена влажными непрочными рыхлыми кусками размером 3–5 мм, состоящими из тонкодисперсных частиц; куски рассыпаются при незначительном механическом воздействии. Для проведения ситового анализа руду предварительно подвергали слабому разрушению в лабораторном истирателе. Затем к 100 г руды добавляли 500 мл воды, выдерживали смесь в течение несколько часов и разделяли по классам крупности на ситах с размером 500, 160, 80 и 40 мкм; полученные фракции высушивали при 150 °С.

Данные о распределении частиц по размерам приведены на рис. 1. Видно, что более 50 % частиц относится к классу крупности менее

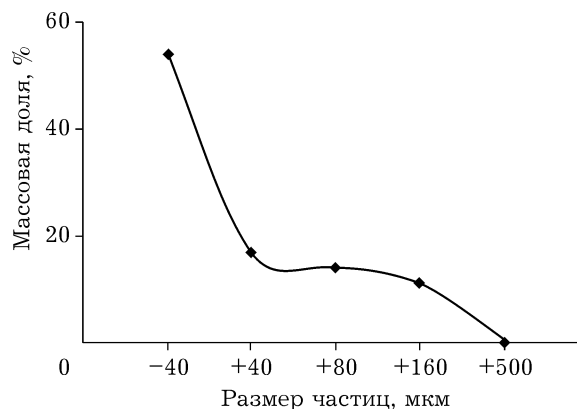


Рис. 1. Распределение по размеру частиц истертой чукутконской руды по данным ситового анализа.

40 мкм и около 90 % — менее 160 мкм (массовая доля фракции менее 40 мкм — 54 %, +40 мкм — 16.9, +80 мкм — 14.2, +160 мкм — 11.3 %). В табл. 2 приведен элементный состав фракций.

Из полученных данных следует, что преобладающая часть элементов распределяется достаточно равномерно по классам крупности от -40 до +160 мкм с небольшим увеличением в мелкой

ТАБЛИЦА 2

Результаты ситового анализа чукутконской руды

Оксид	Содержание, %, во фракциях, мкм			
	-40	+40	+80	+160
Al_2O_3	6.30	5.40	5	5.00
BaO	1.70	1.70	2.00	2.20
CaO	0.87	0.95	1.10	1.20
Ce_2O_3	2.60	2.00	2.00	1.80
Fe_2O_3	60	62	61	62
La_2O_3	1.90	1.40	1.50	1.30
MgO	0.15	0.17	0.13	0.13
MnO_2	9.90	11	12	12
Nb_2O_5	1.90	1.20	1.00	0.85
Nd_2O_3	1.00	0.83	0.82	0.81
P_2O_5	4.30	4.30	4.30	4.30
Pr_2O_3	0.28	0.21	0.32	0.24
SO_3	0.61	0.58	0.69	0.93
SiO_2	5.10	5.40	4.90	4.60
SrO	0.54	0.51	0.50	0.29
ThO_2	0.15	0.11	0.10	0.09
TiO_2	1.30	1.30	1.20	1.10
V_2O_5	0.26	—	0.29	0.28
Y_2O_3	0.21	0.18	0.18	0.17
ZnO	0.77	0.75	0.87	0.96

фракции содержания кремния и алюминия и снижением количества марганца. Содержание РЗМ и ниобия во фракции до 40 мкм возрастает в 1.3 и 2 раза соответственно. В то же время при выходе фракции 54 % общее количество РЗМ в ней составляет примерно 60 %, а ниобия – 70 %, что недостаточно для использования гравитационных методов обогащения чукотконских руд.

На рис. 2 приведено распределение частиц по размерам, полученное с использованием лазерного дифракционного анализатора частиц LA-300 (Horiba) при различной продолжительности измельчения руды в шаровой мельнице. На кривой распределения хорошо выражены два максимума с размером частиц ~2 и ~12 мкм, причем с увеличением времени измельчения первый значительно возрастает, а второй убывает.

Размеры частиц в осветленной суспензии при отстаивании измельченной руды определены методом спектроскопии динамического рассеяния света одновременно с измерением дзета-потенциала. Результаты измерений (рис. 3) показывают унимодальное распределение гидродинамического диаметра частиц с максимумом в области чуть менее 1 мкм после 10 мин отстаивания, положение которого медленно смещается в сторону меньших значений в ходе отстаивания, достигая 700 нм после

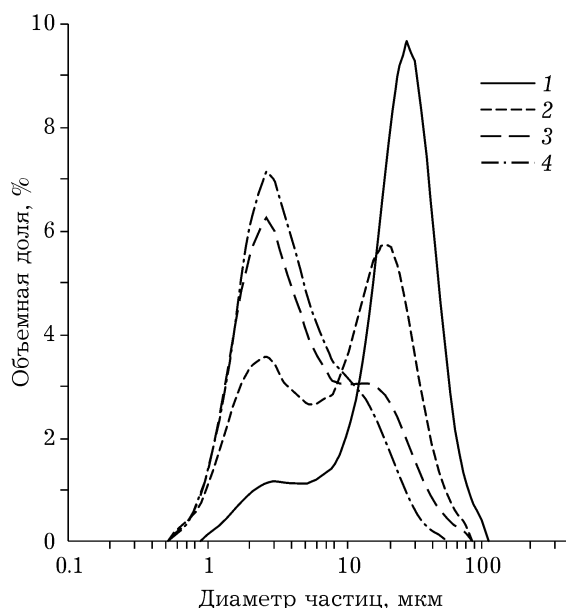


Рис. 2. Распределение по размерам частиц чукотконской руды по данным лазерной дифракции: 1 – после разрушения комков руды в лабораторном истирателе, 2–4 – после мокрого измельчения в барабанной мельнице в течение 0.5 (2), 1 (3) и 1.5 ч (4).

50 мин. Следует отметить, что измерения осложняются наличием более крупных частиц, образующихся в ходе агрегации. Измеренный дзета-потенциал при естественно создающейся в водной суспензии величине pH~6 равен –18 мВ, и это значение устойчиво во времени.

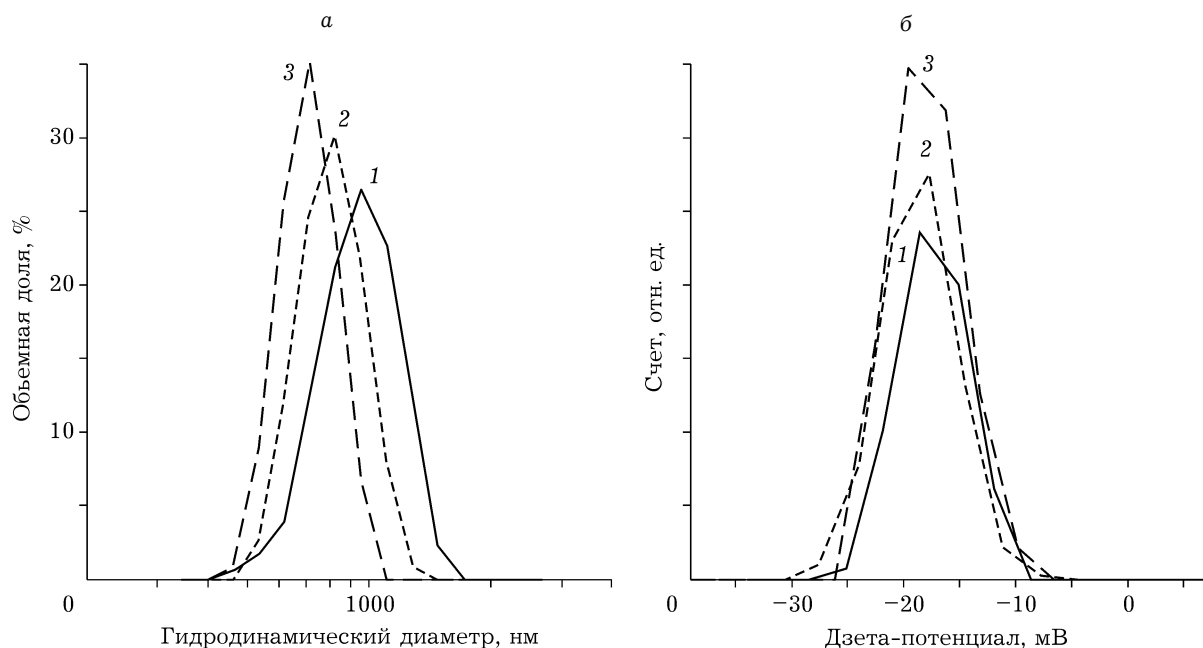


Рис. 3. Гидродинамический диаметр (а) и дзета-потенциал (б) коллоидных частиц после отстаивания пульпы чукотконской руды в течение 10 (1), 20 (2) и 50 мин (3).

ТАБЛИЦА 3

Состав фракций руды, выделенных отмывкой фракции –40 мкм водой

Оксид	Содержание, %, во фракции, мкм	
	10–40	0–10
Al ₂ O ₃	5.90	6.60
BaO	1.70	1.50
CaO	0.90	1.10
Ce ₂ O ₃	2.70	2.40
Fe ₂ O ₃	63.00	60.00
La ₂ O ₃	1.90	1.80
MgO	0.12	0.13
MnO ₂	10.00	9.70
Nb ₂ O ₅	1.90	2.10
Nd ₂ O ₃	0.94	1.10
P ₂ O ₅	2.90	3.30
Pr ₂ O ₃	0.33	0.31
SiO ₂	4.80	5.40
SrO	0.33	0.64
ThO ₂	0.15	0.16
TiO ₂	1.30	1.30
ZnO	0.83	0.84

Гидродинамическим методом фракция руды крупностью –40 мкм разделена на два продукта, содержащих преимущественно частицы со средним размером 1–10 мкм (выход продукта 8 %) и 10–40 мкм (92 %). Данные о содержании основных компонентов в этих фракциях приведены в табл. 3. Видно, что составы различаются незначительно, следовательно, можно предположить агрегацию частиц размера ~2 мкм с образованием более крупных глобул со средним размером 12 мкм.

Для повышения эффективности разделения частиц руду обрабатывали раствором NaOH, доводя реакцию среды до pH 8, более благоприятной для предотвращения агрегации частиц. Расход NaOH при этом составлял примерно 0.1 моль на 1 кг руды. В остальном условия эксперимента были прежними: 100 г руды обрабатывали в 500 мл, реакцию среды доводили раствором NaOH до pH 8, разделяли руду на ситах 500, 160, 80 и 40 мкм, сушили фракции при 150 °С, взвешивали и прокаливали при 650 °С для проведения рентгенофлуоресцентного анализа.

Установлено более заметное (с 54 до 62 %) увеличение доли частиц –40 мкм. Анализ состава выделенных фракций показал, что составы мелких и крупных частиц различаются в большей мере по сравнению с предыдущим экспериментом (ситовое разделение руды в воде). Это касается в основном ниобия и РЗМ. В целом, большинство элементов распределяется между фракциями достаточно равномерно.

Результаты исследования распределения частиц по размерам для фракции –40 мкм методом лазерной дифракции также сопоставимы с полученными ранее. Гидродинамическим методом фракция крупностью –40 мкм разделяется на две части – крупную (выход 35 %) и тонкую (45 %). Как и в предыдущем случае, составы различаются незначительно, лишь в тонкой фракции заметно возрастает содержание алюминия и фосфора (табл. 4).

Дифрактограммы полученных образцов также слабо отличаются от дифрактограмм исходной руды.

ТАБЛИЦА 4

Состав фракций, выделенных отмывкой руды –40 мкм слабощелочным раствором

Оксид	Содержание, %, во фракции, мкм	
	10–40	0–10
Al ₂ O ₃	2.90	5.10
BaO	1.60	1.60
CaO	0.72	0.82
Ce ₂ O ₃	2.20	2.60
Fe ₂ O ₃	68.00	63.00
K ₂ O	0.11	0.11
La ₂ O ₃	1.70	1.90
MgO	0.14	0.14
MnO ₂	10.00	9.50
Nb ₂ O ₅	2.30	2.00
Nd ₂ O ₃	0.83	1.20
P ₂ O ₅	2.80	4.50
Pr ₂ O ₃	0.26	0.32
SiO ₂	2.50	3.40
SrO	0.26	0.67
ThO ₂	0.12	0.15
TiO ₂	1.50	1.30
V ₂ O ₅	0.29	0.26
Y ₂ O ₃	0.28	0.21
ZnO	0.78	0.82

Полученные данные свидетельствуют об исключительно высокой дисперсности чулуконских руд и тесной ассоциации минералов РЗМ с породообразующими минералами, прежде всего с оксидами железа (гетитом и гематитом), что существенно усложняет выделение с хорошими выходами концентратов редких металлов (РЗМ или ниобия) гравитационными методами.

Исследование руды с использованием электронной микроскопии

Продолжены исследования структуры руды с использованием электронной микроскопии [6].

Результаты микроскопических исследований подтверждают выводы о доминировании высокодисперсных минеральных частиц. Исходная рудная проба представлена в основном частицами микро- (первые микрометры) и нанометрового (менее 10 нм) диапазона. Глобулы размером до нескольких десятков микрометров представляют собой рыхлые порис-

тые структуры, сложенные из более тонких (на порядок) частиц. Микрометровые частицы также не монолитны, а представляют собой плотные, тесно сросшиеся агрегаты, вероятно, с малопористой структурой (рис. 4). Входящие в их состав частицы наноразмерны.

“Нанопыль” диаметром менее 3 нм покрывает поверхность более крупных частиц (1–3 мкм) и затеняет их структуру. После отмывки (отмучивания) морфология и структура поверхности микрометровых частиц проясняется. Морфологически частицы можно разделить на игольчатые неупорядоченные и упорядоченные обломочные агрегаты (также размером 1–2 мкм), рыхлые округлые агрегаты из овальных мелких частиц или хлопьев, плотные обломочные частицы (5–6 мкм) и редкие дендритные агрегаты (1–3 мкм), собранные из мелких сферических глобул (10–20 нм).

Обработка образцов руды раствором соляной кислоты и ЭДТА (растворение до 10 % массы оксидов) также приводит к исчезновению “на-

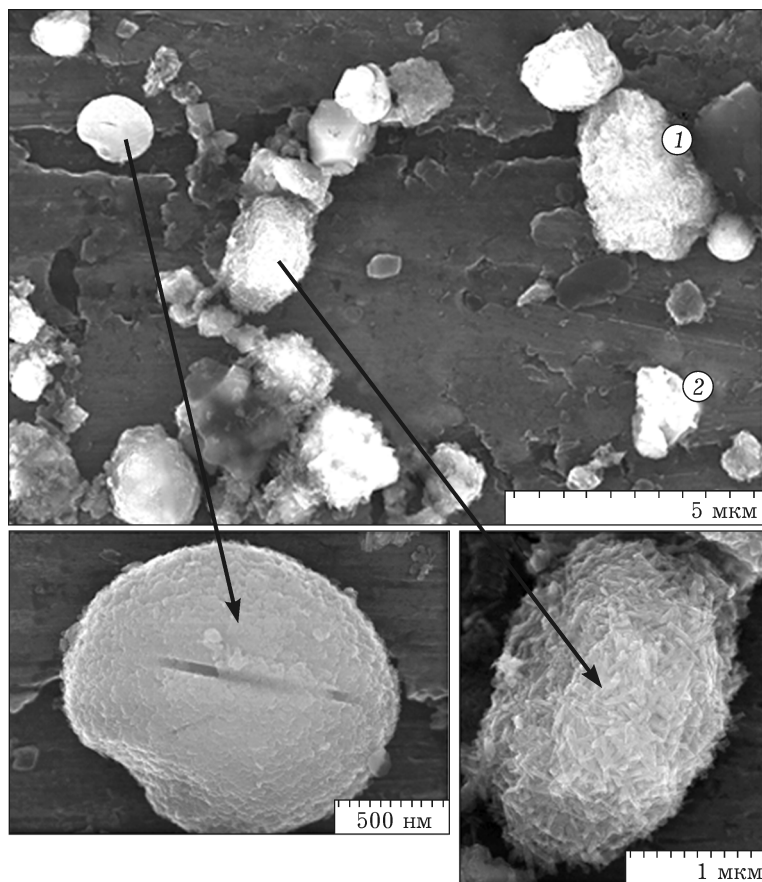


Рис. 4. Церий-неодим-лантан-оксидные частицы (1, 2) в окружении железооксидных частиц различной морфологии.

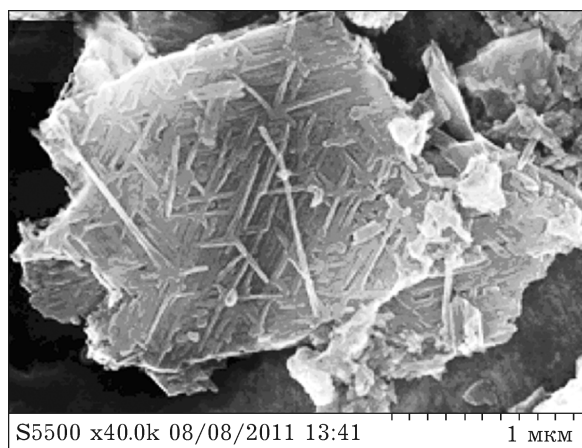


Рис. 5. Упорядоченные игольчатые агрегаты оксидов-гидроксидов марганца.

нопыли”, а микроскопические изображения частиц становились более четкими. При этом общая картина не изменялась, а типичный образец представлен в основном железоксидными частицами размером 1–2 мкм, массивными или конгломератами более мелких частиц (50–10 нм).

В целом, частицы руды сложены оксидами железа и имеют явно гидротермальное происхождение. Марганец преимущественно находится в рассеянном состоянии. Отдельные частицы с высоким содержанием оксидов марганца представляют собой агрегаты игольчатых частиц с толщиной кристаллов 50–60 нм, ассоциированных с кремнием и барием, имеют “примазки” железоксидных частиц (100–200 нм) (рис. 5).

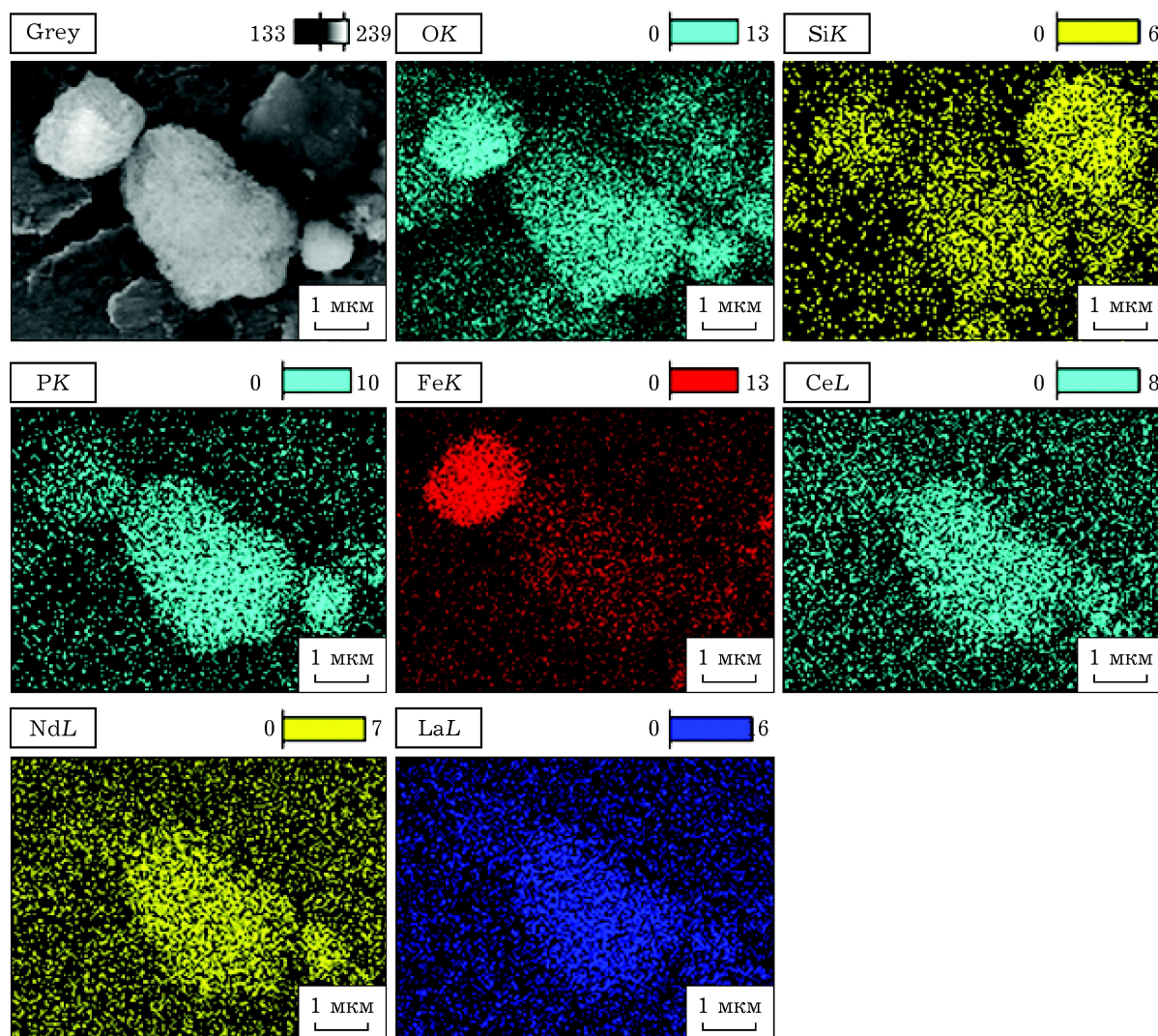


Рис. 6. Результаты элементного картирования частицы монацита.

Рыхлые агрегаты из округлых частиц или хлопьев представлены оксидами железа, ассоциированными с марганцем и кремнием, а плотные обломки – в основном фосфатом кальция (апатитом) и ассоциированы с кремнием, углеродом и, возможно, фтором. Отдельные частицы, содержащие ниобий или редкоземельные элементы, встречаются крайне редко.

Минеральные частицы РЗМ (см. рис. 4, 6) имеют форму сложных агрегатов. Некоторые из них полностью раскрыты, другие находятся внутри железооксидных агрегатов. Разложением фосфатов РЗМ в растворе азотной кислоты (4 моль/л) при 200 °С, когда основные минеральные формы железа не растворяются [10], установлено, что в железооксид-

ные частицы вкраплен флоренсит, в то время как монацит раскрыт и, по данным РФА, полностью разрушается. Доля нераскрытых минералов РЗМ составляет примерно 15 % от общего количества.

Оксиды ниобия встречаются редко, в виде бариевого и стронций-бариевого пирохлора. В отличие от других минералов пирохлор значительно слабее ассоциирован с оксидами и гидроксидами железа.

Исследование поверхности частиц руды с использованием РФЭС

Измерения проводились с помощью фотоэлектронного спектрометра SPECS (SPECS

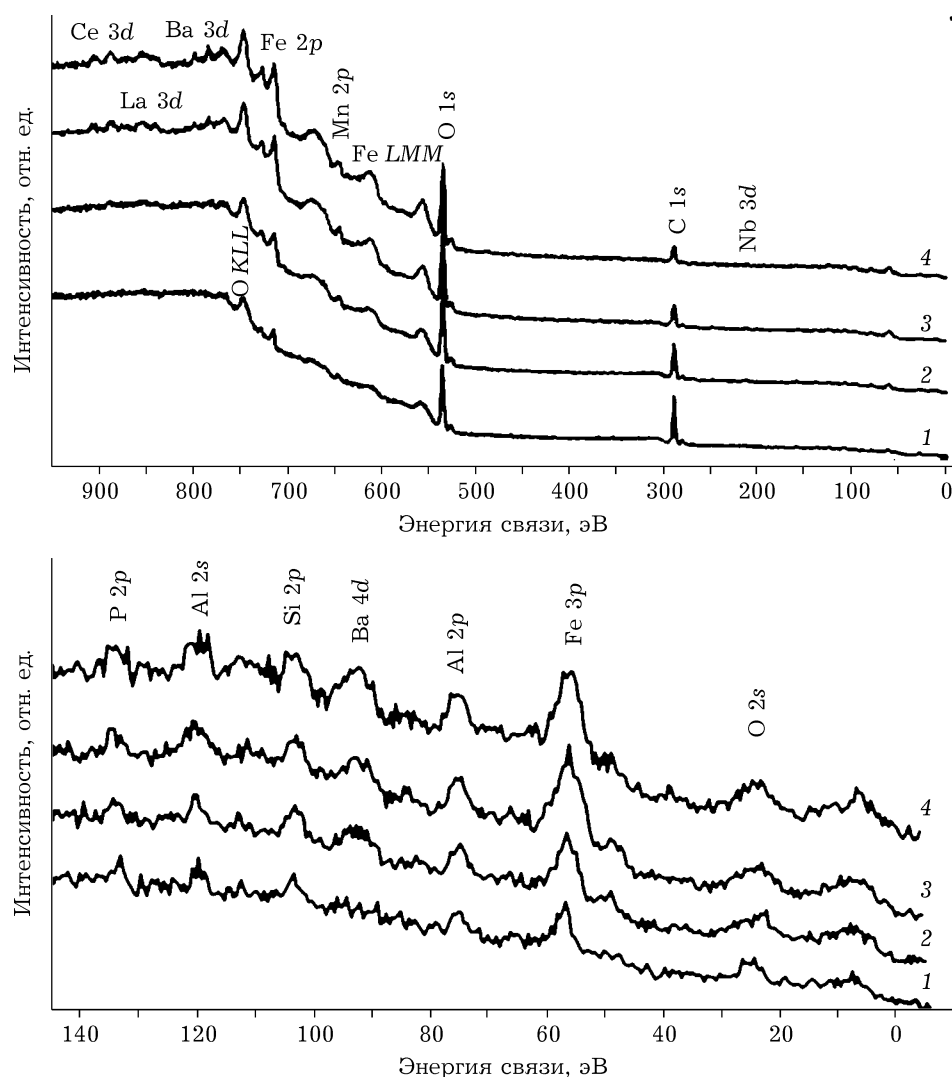


Рис. 7. Обзорные РФЭС-спектры пробы чукутконской руды до (1) и после (2–4) ионного травления различной продолжительности, мин: 6 (2), 10 (3), 20 (4).

ТАБЛИЦА 5

Атомные концентрации элементов на поверхности образцов исходной чукуконской руды и после обработки раствором HCl (убыль массы 10 %), по данным РФЭС

Материал	Время Ar ⁺ - травления, мин	Содержание, ат. %								
		O	Ce	La	Nb	Fe	Mn	P	Si	Al
Исходная руда	0	78.7	0.32	Следы	0.34	6.6	1.8	2.5	3.6	4.3
» »	6	69.9	0.43	0.37	0.34	9.7	3.4	2.0	4.5	8.2
» »	20	59.4	1.50	0.71	0.42	15.5	3.8	2.5	7.0	7.8
Руда, обработка HCl	0	76.5	0.72	Следы	0.48	5.50	2.6	2.1	5.2	5.3
» »	6	69.8	0.61	Следы	0.44	12.4	1.7	2.0	5.6	6.9
» »	20	62.4	1.34	Следы	0.43	13.7	2.8	3.4	5.6	7.3

GmbH, Германия) при возбуждении MgK_α-излучением рентгеновской трубки с двойным анодом. Бомбардировка образцов ионами Ar⁺ (1 мин ионного травления соответствует удалению порядка 0.2–0.5 нм поверхностного слоя) использована для удаления загрязнений и повышения качества спектров, а также для оценки распределения элементов и соединений по глубине частиц. В случае полидисперсного образца полученные данные позволяют качественно оценить состав поверхностных и более глубоких слоев частиц руды.

На рис. 7 приведены обзорные спектры образца чукуконской руды до и после ионного травления с различной продолжительностью, в том числе для области низких энергий связи. В табл. 5 указано содержание основных элементов на поверхности исходной руды и после обработки раствором соляной кислоты; углерод, входящий преимущественно в слой углеводородных загрязнений поверхности, не учитывался. Видно, что наиболее высокие поверхностные концентрации, помимо кислорода, характерны для железа, алюминия, кремния, фосфора, марганца. При ионном травлении наиболее значительно возрастают концентрации Fe и Ce (до примерно 10 и 1 ат. % соответственно). Следовательно, минералы этих металлов в наибольшей степени экранированы другими соединениями: железо – адсорбированной водой и, возможно, органическими соединениями, церий (лантаноиды) – оксидами железа и других минералов, с которыми ассоциирован монацит и флоренсит. Не столь значительно растут поверхностные концентрации Si, Al, Mn. Концентрация Nb при ионном травлении почти не изменяется или

даже несколько снижается. Это свидетельствует о том, что пироксид слабо ассоциирован с другими минеральными частицами.

После кислотной обработки, в результате которой выщелачивается примерно 10 % массы образца, заметно повышается относительная концентрация Ce (лантаноидов). Вероятно, это обусловлено разрушением ассоциатов и растворением поверхностной железооксидной пленки на монаците и флоренсите.

Ошибки определения методом РФЭС металлов с низкими содержаниями в руде (PЗЭ, Nb) и легких элементов с низкими коэффициентами чувствительности (Si, Al, P) могут быть велики, поэтому требуется проверка с применением других методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чукуконские руды являются комплексными, имеют преимущественно железомарганцевый состав и характеризуются значительным содержанием бария, фосфора, ниобия, лантаноидов, иттрия, скандия, ванадия и цинка. Основные минеральные формы железа – гематит и гетит, марганца – псиломелан и пиролюзит, PЗМ – монацит и флоренсит, ниобия – стронций-бариевый пироксид.

Исследование гранулометрического состава показало, что свыше 50 % массы руды представлено классом крупности частиц –40 мкм (данные ситового анализа), причем преобладают частицы с размерами 1–2 мкм и примерно 12 мкм. Примечательно, что выход высокодисперсных микрометровых частиц быстро растет с увеличением времени измельчения.

Элементы в основном распределяются равномерно по всем классам крупности (от –40 до +160 мкм). Хотя содержание РЗМ и ниобия увеличивается в тонких фракциях, получить с помощью гравитационных методов богатые концентраты РЗМ с хорошими выходами не представляется возможным.

Согласно результатам микроскопических исследований, руда образована в основном ультрадисперсными частицами микро- (первые микрометры) и нанометрового диапазона. Глобулы руды размером до нескольких десятков микрометров представляют собой рыхлые пористые структуры, сложенные более тонкими микрометровыми частицами, которые, в свою очередь, не монолитны, а представляют собой плотные агрегаты, вероятно, с мелкопористой структурой. Входящие в их состав частицы наноразмерны. Результаты экспериментов по кислотному выщелачиванию минералов РЗМ и данных РФА показывают, что монацит в основном раскрыт, а флоренсит тонко вкраплен в оксидные формы железа и не переходит в раствор. Доля “закрытых” форм фосфатов РЗМ составляет почти 15 %. Это согласуется с результатами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, согласно которым, на поверхности частиц концентрации РЗМ ниже, чем в более глубоких слоях. Минерал ниобия – пирохлор – в значительной меньшей степени ассоциирован с оксидами железа, чем другие минералы.

Таким образом, очевидно, что обогащение чукотконских руд традиционными методами практически невозможно. По-видимому, малоэффективным будет и применение развивающихся новых методов разделения тонкодисперсных руд, как из-за широкого диапазона размеров частиц минеральных компонен-

тов, так и по причине значительной ассоциации их с оксидами и гидроксидами железа. На наш взгляд, для решения проблем обогащения чукотконских руд необходимо предварительно разрушить плотные минеральные агрегаты железооксидных частиц на микронном уровне. Современные методы измельчения для этих целей малопригодны, гораздо более перспективной представляется предварительная термохимическая обработка руды, возможно, в сочетании с механической. При решении задачи разрушения железооксидных агрегатов, по крайней мере, станет возможным отделение ниобия и РЗМ от основной массы оксидов железа полиградиентной магнитной сепарацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ломаев В. Г., Сердюк С. С. // Журн. СФУ. Сер. “Техника и технологии”. 2011. Т. 4, № 2. С. 132–154.
- 2 Ломаев В. Г., Кузьмин В. И. // Разведка и охрана недр. 2003. № 6. С. 23–25.
- 3 Сердюк С. С., Ломаев В. Г., Контарович А. А. // Минер. ресурсы России. 2000. № 3. С. 13–27.
- 4 Serdyuk S. S., Lomaev V. G., Kuzmin V. I., Pashkov G. L., Shabanov V. F., Pavlov V. F., Mamonov S. N. // J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Techn. 2015. Vol. 8, Issue 7. P. 816–834.
- 5 Кузьмин В. И., Ломаев В. Г., Пашков Г. Л., Овчинников С. В., Кузьмина В. Н., Дорохова Л. И. // Цв. металлы. 2006. № 12. С. 62–68.
- 6 Кузьмин В. И., Кузьмин Д. В., Жижаев А. М. // Журн. СФУ. Сер. “Химия”. 2013. Т. 6, № 3. С. 303–312.
- 7 Кузьмин В. И., Пашков Г. Л., Кузьмина В. Н., Калякин С. Н., Дорохова Л. И., Павлов В. Ф., Ломаев В. Г. // Химия уст. разв. 2010. Т. 18, № 3. С. 331–338.
- 8 Шабанов В. Ф., Кузьмин В. И., Павлов В. Ф., Ревенко Ю. А. // Вестн. СибГАУ им. акад. М. Ф. Решетнева. 2012. Т. 46, № 6. С. 234–237.
- 9 Kuzmin V. I., Pashkov G. L., Lornaev V. G., Voskresenskay E. N., Kuzmina V. N. // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 129–130. P. 1–6.
- 10 Serdyuk S. S., Lomayev V. G., Kuzmin V. I., Flett D. S., Gudkova N. V., Kuzmin D. V., Mulagaleeva M. A., Kuzmina V. N., Kalyakin S. N., Logutenko O. A. // Minerals Eng. 2017. Vol. 113. P. 8–14.